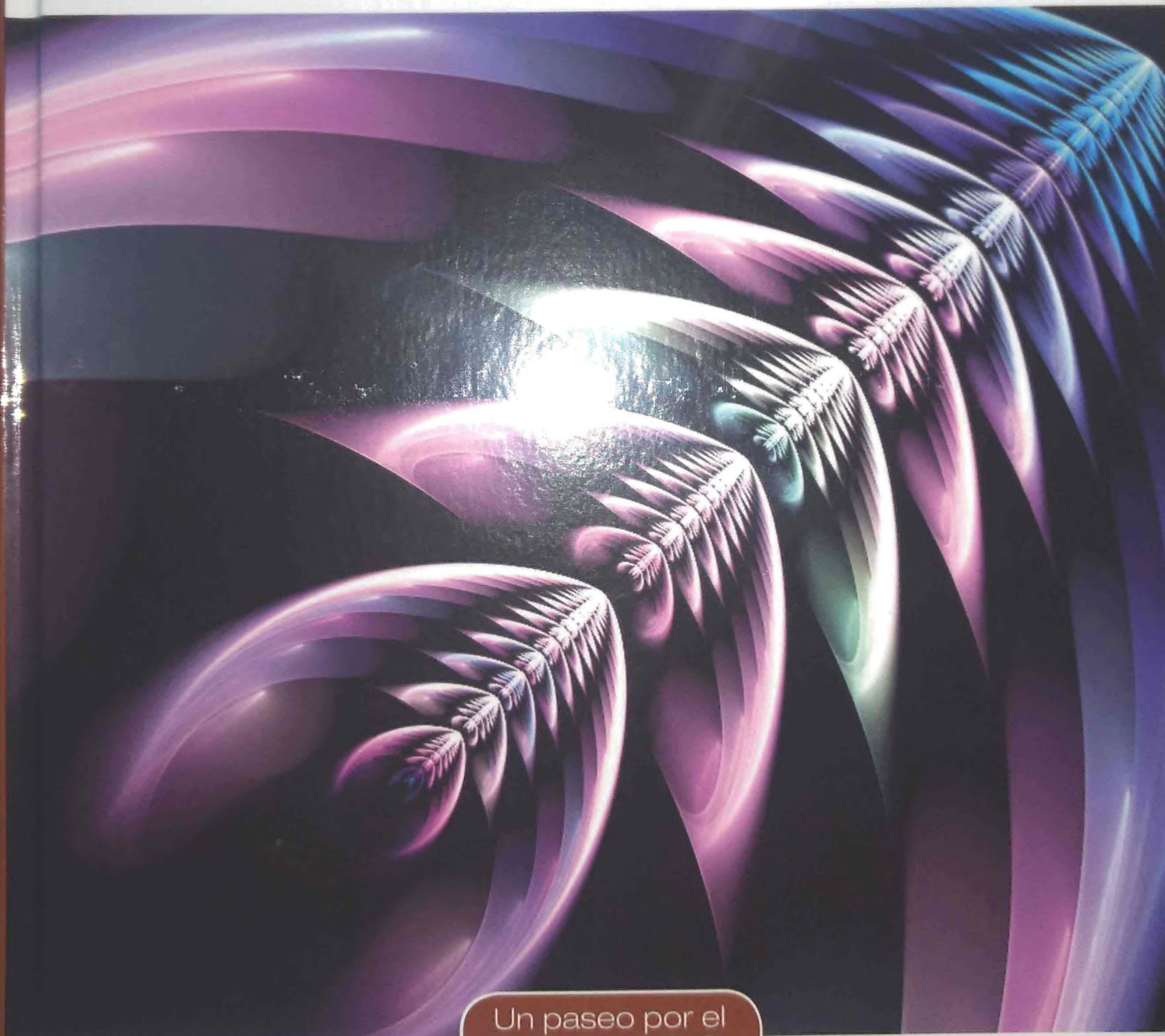


# La flecha del tiempo

¿Tiene el tiempo  
una única dirección?



Un paseo por el  
**COSMOS**





The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmourea.blogspot.com/>

# La flecha del tiempo

¿Tiene el tiempo  
una única dirección?

**RBA**



*Imagen de cubierta:* Fractal cuya estructura conforma una imagen alegórica de la flecha del tiempo. Las ecuaciones de la física parecen negar su orientación, que corresponde al flujo del tiempo en un solo sentido.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© David Blanco Laserna por el texto  
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.  
© 2015, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock/ CSP-ESchweitzer: 76-77; Archivo RBA: 21i, 21d; European Space Agency/Planck Collaboration: 35; NASA, ESA, Z. Levay y R. van der Marel (STScI), T. Hallas y A. Mellinger: 96-97; Popular Science Monthly: 45; Preikia: portada.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8308-5  
Depósito legal: B 19606-2015

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)  
Impreso en España - *Printed in Spain*

## SUMARIO

INTRODUCCIÓN .....	7
CAPÍTULO 1 La paradoja del tiempo .....	13
CAPÍTULO 2 El tiempo y el azar .....	39
CAPÍTULO 3 El pasado oscuro del universo .....	81
CAPÍTULO 4 Tiempo cuántico, tiempo relativo, .....	127
LECTURAS RECOMENDADAS .....	155
ÍNDICE .....	157



## INTRODUCCIÓN

---

El paso del tiempo destaca como uno de los grandes motivos universales. Se trata de un cliché que ni siquiera el propio paso del tiempo ha conseguido desgastar. Ha sabido captar por igual la imaginación de filósofos, músicos, pintores, novelistas, poetas, científicos... La lista puede extenderse tanto como se quiera, puesto que rara es la persona que en algún momento de su vida no ha reflexionado, con mayor o menor detenimiento, o con mayor o menor inquietud, acerca de la fugacidad de la existencia. Dicen que la fórmula de la comedia suma tragedia más tiempo, pero el curso del tiempo no hace sino agravar los dramas que él mismo ocasiona, como los estragos de la edad, la perspectiva de la muerte o la convicción de que se ha desperdiciado la vida. Reconocemos en el tiempo uno de los ingredientes fundamentales de nuestra experiencia del mundo. No logramos recordar cuándo despertó nuestra conciencia de él y nos cuesta aceptar que llegará la hora en que se interrumpirá para siempre. La irreversibilidad del tiempo proyecta una sombra que acompaña cada paso que damos. En ese sentido, no podría resultar una vivencia más cotidiana o natural. Sin embargo, al reflexionar sobre ella le sucede a uno como al caballero que pretendía acostarse en



el lecho encantado, que cada vez que creía tocarlo veía cómo se alejaba de un salto, quedando siempre fuera de su alcance.

San Agustín se entregó a este juego exasperante y, en el proceso, urdió uno de los discursos mejor trabados en torno al tiempo que alumbrara la antigua filosofía. *Las confesiones* se abren con un animado relato de sus pecados, meros preámbulos del episodio, tan feliz como previsible, de su conversión. Quizá porque el género autobiográfico invita a la introspección, a partir del capítulo XI, san Agustín deja a un lado el chismorreó y se entrega a las especulaciones filosóficas. Muchas ediciones populares no le perdonan este cambio de tercio y solo incluyen los diez primeros capítulos. Excluyen así el pasaje donde el santo se plantea el gran interrogante: ¿qué es el tiempo? «Si nadie me lo pregunta, lo sé; si pretendo explicarlo a quien me lo pregunta, no lo sé». A continuación, desmonta con perspicacia la engañosa familiaridad de esta cuestión, trillada y a la vez recóndita. Concluye que el pasado y el futuro no existen más que como recuerdos o expectativas que la razón estima desde el presente.

¿Y qué es el presente? La encarnación de la fugacidad misma, la mínima cantidad de tiempo, indivisible, que vuela del pasado al futuro. Este tránsito se describe casi en clave de adivinanza: el tiempo «pasa de aquello que aún no es, por aquello que carece de espacio, hacia aquello que ya no es». San Agustín reconoce su impotencia para resolver el enigma y, en su desesperación, pide ayuda a Dios. Las perplejidades del tiempo preceden, desde luego, al santo de Hipona y no se agotaron con él. Los artistas han abordado el mismo motivo con una disposición de ánimo menos analítica. Pintaron calaveras en sus bodegones, como intrusos entre los instrumentos musicales, los collares de perlas o los exuberantes fruteros que simbolizaban los placeres de la vida. Un caudal de sentencias griegas y latinas declaró la naturaleza fugitiva e irreversible del tiempo. Desde el «todo fluye, nada permanece» de Heráclito hasta el *tempus fugit* o el *carpe diem* que se inscribía, como una melancólica advertencia, en la esfera de los relojes.

Detrás de la belleza de las palabras o de las imágenes, late con fuerza la asimetría del tiempo. La vida nos impone un viaje sin

retorno: «Ayer se fue; mañana no ha llegado; / hoy se está yendo sin parar un punto». El pasado queda siempre fuera de nuestro alcance. No podemos detener ni invertir el flujo de los minutos y las horas, como deshacemos el camino que recorremos en el espacio. Somos incapaces de acelerar el ritmo de los relojes o de frenar nuestra marcha temporal. El pasado se extiende como un territorio libre de sorpresas, en contraposición al futuro, que solo adquiere forma difusa a base de indicios y conjeturas. Desde la atalaya del presente, resulta inmediato atribuir dos sentidos claros y diferenciados al tiempo. Uno apunta al pasado; el otro, al futuro. Un impulso ciego nos arrastra en uno solo de los sentidos, engrosando los recuerdos y precipitándonos en la incógnita constante del futuro.

¿Cómo refleja la física una experiencia humana tan evidente? De entrada, distingue con claridad entre fugacidad y asimetría. En cierta medida, la relatividad especial dinamita la metáfora del tiempo como una corriente en la que se ve arrastrada nuestra conciencia. La sustituye por una imagen estática, en cuatro dimensiones, que ofrece perspectivas diversas en función del punto de vista que se adopte para contemplarla. Dos sucesos que una persona juzga simultáneos pueden no serlo para otra. Hasta el extremo de que, para un observador determinado, la extinción de los dinosaurios podría coincidir con otro acontecimiento que nosotros ubicamos en un futuro lejano. En el último capítulo prestaremos la debida atención al paisaje relativista. Sin duda desmiente muchas intuiciones de la física clásica acerca del tiempo, aunque solo toca de modo tangencial la cuestión de la flecha. La asimetría, por el contrario, se sitúa en su mismo centro. En un contexto ajeno por completo, el matemático británico Paul Adrien Maurice Dirac comentó que la famosa ecuación que lleva su nombre —que especifica la dinámica cuántica y relativista de un electrón— era más lista que él mismo. Cabría extender la observación a las ecuaciones fundamentales de la física y sospechar que saben algo que nosotros pasamos por alto, ya que no diferencian el pasado del futuro. Para ellas los dos sentidos del tiempo ofrecen alternativas equiparables, como ir hacia arriba o hacia abajo, dirigirse a oriente o a poniente.



El mecanismo de las ecuaciones opera con la misma soltura si se le da cuerda hacia delante o hacia atrás. Es perfectamente reversible. Se podría objetar que esto no es del todo cierto. Como veremos, las leyes de la física manifiestan ciertas asimetrías a un nivel profundo, pero aplazaremos tales sutilezas, de nuevo, hasta el último capítulo, dado que, para la mayoría de los científicos, no enturbian los argumentos generales que expondremos antes.

El astrónomo inglés Arthur Eddington fue quien habló por primera vez de la «flecha del tiempo» en 1923, en la Universidad de Edimburgo, en el marco de una de las *Gifford Lectures*. Aunque el paso de los años desgastara un tanto su fama, Eddington disfrutó en vida de una auténtica celebridad científica, como atestigua la portada que la revista *Time* le dedicó en 1934. En su conferencia de 1927 hizo el relato de las grandes revoluciones que habían sacudido la física durante las dos primeras décadas del siglo xx: la relatividad especial, la relatividad general y la mecánica cuántica. Aunque incruentas, habían causado un impacto demoledor en el imaginario de los científicos. Eddington no solo rindió tributo a las novedades. Por espacio de unos minutos, abordó la contradicción entre el tiempo simétrico de las ecuaciones y el tiempo asimétrico de la experiencia humana. Fue entonces cuando acuñó un término nuevo:

Emplearé la expresión «flecha del tiempo» para significar esta propiedad de sentido único del tiempo que no tiene análogo en el espacio.

Aunque el tiempo parezca conducirnos por una calle de sentido único desde que nacemos hasta que la muerte nos alcanza, las principales leyes de la física —en palabras de Eddington— «se muestran indiferentes a la dirección del tiempo». Esta indiferencia deja sin respuesta la adivinanza de *El Hobbit*:

Es algo que todo lo devora:  
aves, bestias, árboles y flores.  
Roe el hierro, muerde el acero,  
hace polvo la peña más dura,

mata reyes, asola ciudades  
y derriba la montaña más alta.

El tiempo que rige las leyes físicas no impide que el viento, en lugar de erosionar la montaña más alta, acumule durante millones de años y por azar granos de tierra hasta levantar la cordillera del Himalaya, o que el oxígeno abandone la herrumbre del hierro, o que un tronco podrido recupere su vitalidad e involucre hasta convertirse en una semilla. En las ecuaciones laten más posibilidades de las que se realizan en el universo, como si admitieran un repertorio de fenómenos inéditos, reflejos temporales de los que observamos. De ser así, ¿qué ha roto el espejo donde se nos deberían mostrar?

La paradoja de la flecha del tiempo surge porque las personas, a la escala que exploran sus sentidos, distinguen cuándo una película se proyecta rebobinada, pero las leyes que dictan el comportamiento de las partículas que componen a cada uno de sus protagonistas no pueden hacerlo. El quid de la cuestión no radica en la imposibilidad de viajar hacia atrás en el tiempo y de rebobinar de modo literal la película, sino en que no se producen fenómenos «rebobinados», aunque solo sea de manera aislada. Las ecuaciones de Newton, de Einstein o de Schrödinger no prohíben movimientos atómicos o moleculares concertados cuyo efecto visible sea un jarrón que se recompone de forma espontánea a partir de sus añicos. No obstante, jamás se asiste a semejante prodigio. La historia colectiva que trama la materia con sus interacciones desmiente en todo momento la neutralidad temporal de las ecuaciones básicas que, por otra parte, describen con precisión extraordinaria los fenómenos naturales.

Conviene advertir que la comunidad científica no ha alcanzado un consenso en torno a la flecha del tiempo. Hay quien estima que la paradoja nunca existió; otros creen que los fundadores de la física estadística —en particular, el vienés Ludwig Boltzmann— la resolvieron antes de que terminara el siglo xix. La mayoría reconoce que Boltzmann acotó con acierto el terreno en el que debía dirimirse la cuestión, pero que aún desconocía la pieza clave del rompecabezas: el Big Bang. Sea único nuestro universo



o haya surgido de otros que le precedieron, la flecha del tiempo obedecería a las condiciones, ciertamente peculiares, que concurrieron en su origen. Para otros, en fin, las leyes fundamentales que manejamos son aproximaciones demasiado burdas, que todavía no reflejan el verdadero carácter del tiempo. Algunos llegan a negarle todo protagonismo, borrándolo de las ecuaciones. Dos tendencias predominan, empero: quienes apuntan a que la asimetría que se advierte en los fenómenos procede de las reglas del juego y quienes la achacan a la situación inicial de la partida, que condicionó cuanto vino a suceder después.

La flecha del tiempo atraviesa la física de parte a parte. ¿Qué la orientó en la dirección que señala con tenacidad desde hace miles de millones de años? ¿Hay que buscar su causa en el más majestuoso de los escenarios, en la propia evolución del universo, o en el espacio mínimo en el que se desenvuelven las partículas elementales? Para decidirlo, habrá que escudriñar en todos los rincones. Quizá al cabo de la exploración no logremos iluminar por entero el enigma, pero al menos revelaremos parte del asombro y de la extrañeza que se ocultan bajo la más familiar —e irreversible, mortal— de nuestras experiencias.

## CAPÍTULO 1

# La paradoja del tiempo

La experiencia dicta que el tiempo transcurre en un solo sentido, de modo irreversible, del pasado al futuro. Sin embargo, nada en las leyes fundamentales de la física parece impedir que invierta su curso. ¿Fallan las ecuaciones o falla nuestra percepción del tiempo?



La física da cuenta de los cambios que apreciamos en los fenómenos naturales con la ayuda de una variable,  $t$ , que admite como valor cualquier número real (ya sea  $-3$ ,  $\sqrt{5}$  o  $7/2$ ). La llamamos tiempo. Según la ecuación donde aparezca, cuando  $t$  varía se altera la probabilidad de hallar una partícula en un punto o la velocidad de un planeta o el ángulo con el que incide un rayo de luz sobre una superficie. Las leyes no contienen indicaciones acerca de si la magnitud  $t$  que figura en ellas debe aumentar o decrecer. Se limitan a señalar qué sucede con la posición de un cuerpo, por ejemplo, o su velocidad, cuando se modifica su valor, ya sea en un sentido u otro. El físico las interpreta suponiendo que  $t$  siempre crece, pero nada en la propia estructura de las ecuaciones le impone ese criterio. Podemos establecer una analogía con un programa de montaje cinematográfico, que haga correr una secuencia digital de fotogramas, hacia delante o hacia atrás. Las leyes de la física dispondrían cómo deben modificarse los píxeles que integran un fotograma determinado para componer el siguiente de la serie, pero les da igual si el montador pulsa el botón de adelantar o el de rebobinar. En un caso, formarán el fotograma siguiente; en el otro, el anterior. Las ecuaciones ar-



man la película a partir de cualquier fotograma, pero no señalan en qué sentido se debe proceder. Para la ecuación, los términos «anterior» o «siguiente» solo distinguen los dos sentidos, perfectamente equivalentes, en los que puede progresar la construcción de la secuencia.

Estas nociones se aplican a las leyes de Newton, a las ecuaciones de Maxwell, que describen los fenómenos electromagnéticos, a las ecuaciones de Einstein de la relatividad especial y general o a la ecuación de Schrödinger, de la mecánica cuántica. Ampliando un poco la simetría temporal, se podrían aplicar también a las ecuaciones del modelo estándar, que explican todas las interacciones fundamentales, salvo la gravedad.

Las ecuaciones pueden muy bien reaccionar con indiferencia a las decisiones del montador, que fuerza a los fotogramas a saltar hacia delante o hacia atrás, pero la experiencia milenaria de nuestra especie dicta que solo debemos proyectar la película en uno de los dos sentidos. Un ejercicio elemental para alumnos de primaria propone varias imágenes desordenadas que se deben organizar en una secuencia temporal. Un niño caído en el suelo se acaricia un chichón en la coronilla. Hace equilibrios en lo alto de un taburete para coger un tarro de galletas. Observa, sin chichón, las galletas. Interpretamos el orden «correcto» de los episodios por una sencilla razón: desde que nacemos jamás hemos visto que se sucedan de acuerdo a un patrón diferente. El humo no desciende del cielo hasta las brasas, para transformarse en troncos de leña y avivar la hoguera. En el seno de un *gin-tonic* tibio y aguado no cristalizan espontáneamente cubitos de hielo. Los pollitos tampoco se encierran en la cáscara de un huevo para disolverse en la clara y la yema. Se han programado algoritmos que permiten a un ordenador distinguir hasta en un 80% de las ocasiones cuándo los fotogramas de una película se proyectan hacia delante o hacia atrás en el tiempo. Hasta las computadoras aprenden a reconocer la flecha del tiempo.

Una aplastante cantidad de testimonios y el registro escrito acumulado durante siglos de historia confirman que ni nuestros contemporáneos ni nuestros antepasados han sido testigos de secuencias inversas. Los mitos hablan de dragones o de dilu-

vios universales, pero no de mantos de nieve que un día se deshicieron en copos y levitaron hasta perderse entre las nubes. Aunque la lógica matemática tolere fenómenos semejantes, para nosotros son bromas de montador, una fantasía de Méliès. Esas bromas, sin embargo, no provocan hilaridad alguna en las leyes fundamentales, que no las distinguen de la realidad. Frente a su permisividad, ¿por qué la naturaleza actúa de forma tan restrictiva? ¿Hay que incorporar alguna limitación a las leyes de la física para que se ciñan a la experiencia del sentido común? ¿O es que nuestra subjetividad no comprende la verdadera condición del tiempo?

Para no complicar el discurso más de la cuenta, a lo largo de los primeros capítulos adoptaremos una perspectiva newtoniana y asumiremos que tanto la luz como la materia se componen de partículas clásicas. No se pierde nada sustancial en esta aproximación. La cuestión que pretendemos abordar ahora es el aparente desacuerdo entre unas leyes fundamentales simétricas, que operan a escala microscópica, y la percepción humana de una realidad asimétrica. A este fin, la imagen clásica proporciona un escenario intuitivo y claro donde desarrollar y sopesar los argumentos. Las conclusiones a las que lleguemos serán en esencia válidas para otras leyes más exactas que conserven la virtud de ser simétricas. En el último capítulo, ampliaremos la resolución de la imagen microscópica, para tomar en cuenta efectos cuánticos y evaluar si hemos pecado en exceso de ingenuidad. Entonces estudiaremos el impacto de ciertas asimetrías, como las que introducen el colapso de la función de onda o la desintegración de los kaones y mesones B.

Por ahora, aceptaremos que una cantidad extraordinaria de partículas clásicas integra las páginas de este libro, la mano que lo sostiene, la masa de un planeta o el universo entero. Siguen trayectorias bien definidas y todos los cambios que constataremos en el entorno obedecen a su evolución colectiva. Fijemos la atención en una sola partícula. Cuando el tiempo discurre de  $t_1$  a  $t_2$ , su posición pasa de  $p_1$  a  $p_2$ . En general, su velocidad también

Dicen que el tiempo es un gran maestro; lástima que acabe matando a sus estudiantes.

HECTOR BERLIOZ

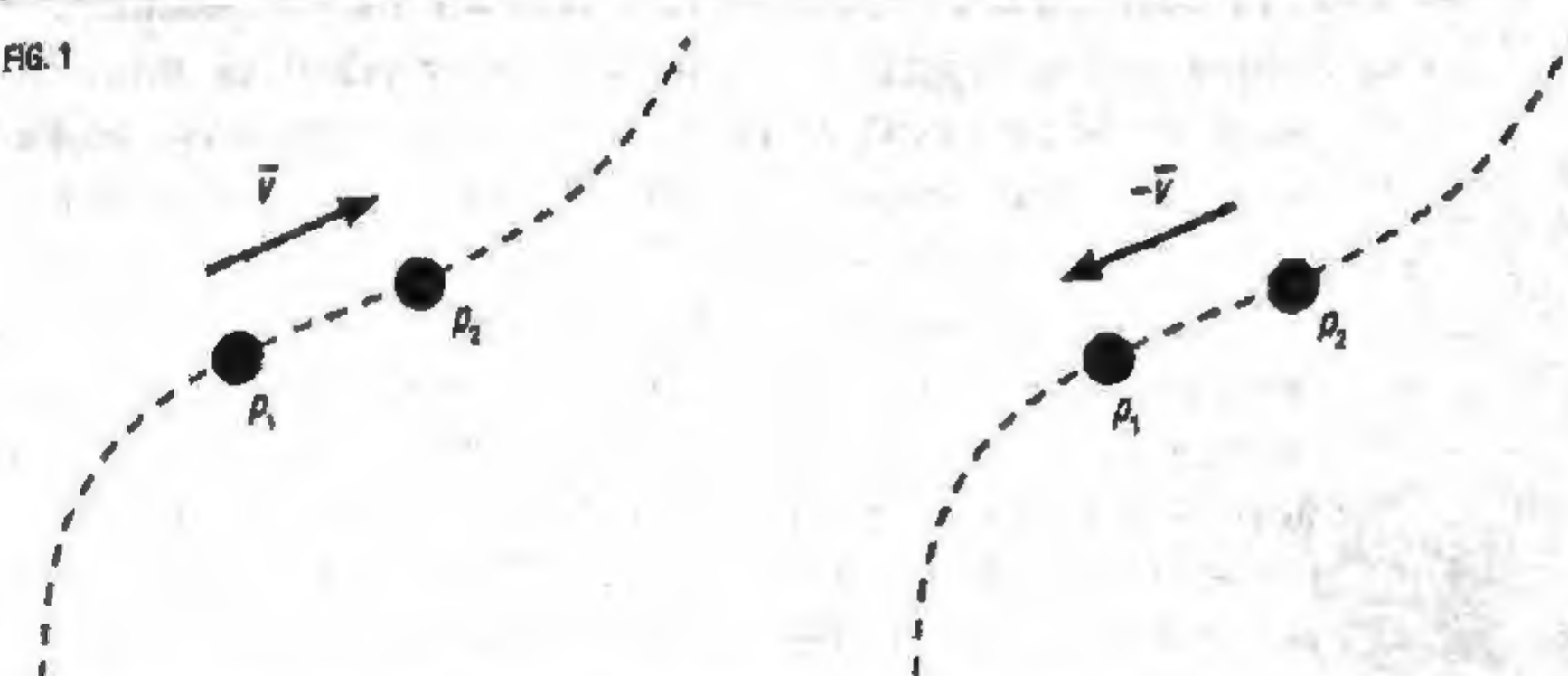


se modificará. En función de las circunstancias, la partícula procederá en línea recta o trazará una curva cualquiera. Puesto que la velocidad es una razón entre espacio y tiempo, invertir el sentido del tiempo invierte el sentido de la velocidad en cada punto del recorrido. Es decir, si  $v$  conduce de  $p_1$  a  $p_2$ ,  $-v$  conducirá de  $p_2$  a  $p_1$  (figura 1). Las ecuaciones dinámicas dibujan con la misma precisión ambas trayectorias, tanto la directa como la inversa, en función de si el tiempo aumenta o disminuye. En el caso de una única partícula, la inversión temporal refleja en un espejo la evolución de la partícula (figura 2). Esa segunda trayectoria espectral, en sí, resulta tan válida como la primera, ya que no lleva inscrito ningún sentido del tiempo.

Si atrapamos la partícula en una caja, por más atención que pongamos en contemplarla, no sabremos deducir si la película del tiempo está corriendo en un sentido u otro. Cada una de las proyecciones es la versión rebobinada de la otra y simplemente corresponde a una partícula que desarrolla una trayectoria diferente, determinada por velocidades opuestas. En ninguna de las alternativas queda definida la flecha del tiempo. Solo aflora en el comportamiento colectivo de cuatrillones de partículas que se da en la naturaleza. Imaginemos, por un instante, una réplica exacta de nuestro universo clásico donde se invirtieran las velocidades de todas las partículas. Tendríamos entonces un universo que retrocede en el tiempo. Lo detectaríamos de inmediato. La flecha del tiempo surge así de la asimetría entre los procesos que se advierten en la naturaleza y sus inversos, sus versiones rebobinadas, que también cumplen las leyes fundamentales y que, no obstante, jamás se observan.

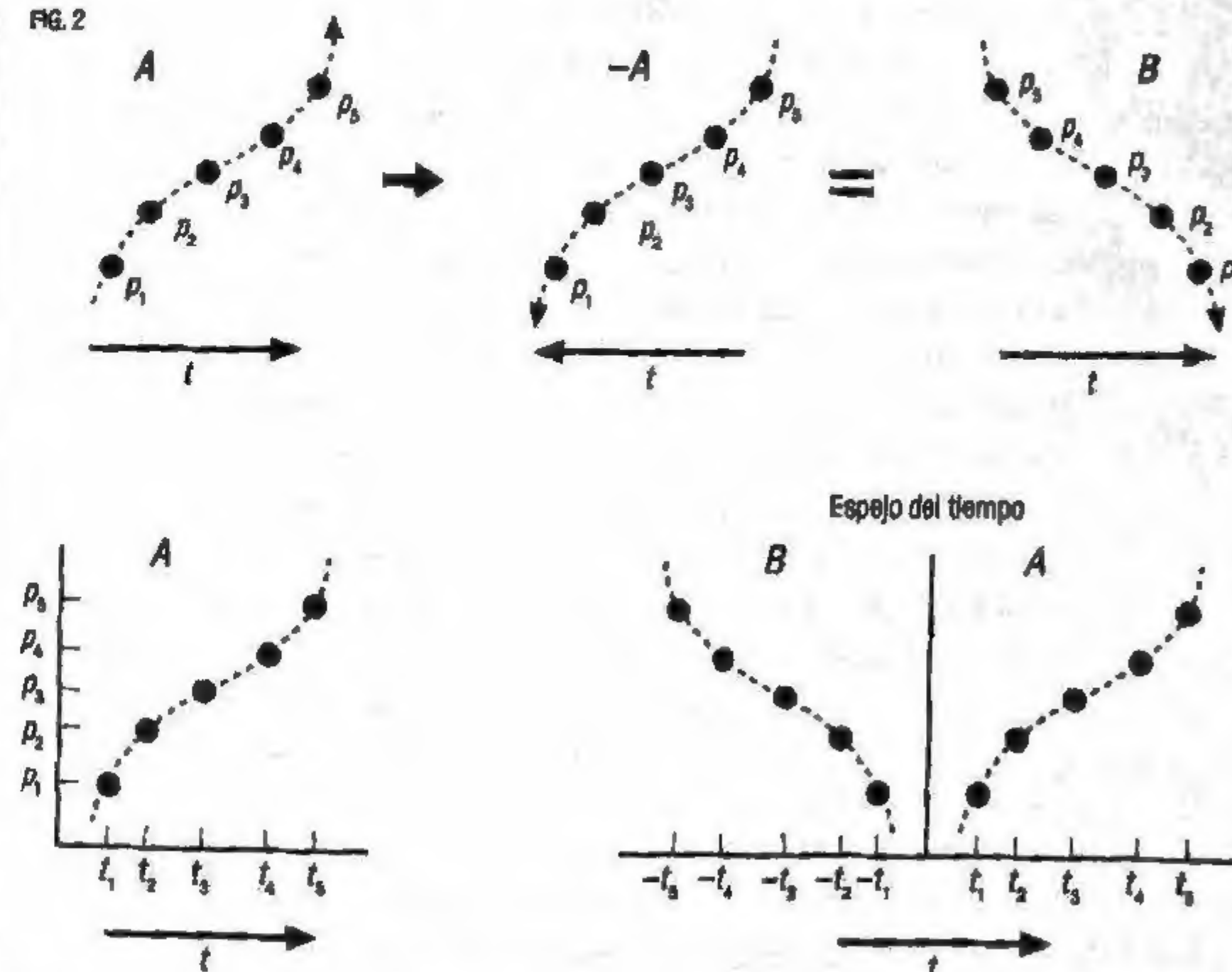
Las leyes fundamentales simétricas parecen sustentar un comportamiento individual simétrico y un caprichoso comportamiento colectivo asimétrico. Los dos próximos capítulos gravitarán en torno a esta desconcertante paradoja. Antes de intentar resolverla, dedicaremos lo que queda de capítulo a contemplar el problema desde un ángulo distinto. Con frecuencia, al discutir sobre la flecha del tiempo, se introducen, casi de manera subrepticia, ciertas expresiones que conviene manejar con cautela. Suelen adoptar la forma de preguntas. ¿Por qué recordamos el pasado,

FIG. 1



Invertir la velocidad equivale a revertir el tiempo, rebobinando la trayectoria y llevando a la partícula de vuelta a  $p_1$ .

FIG. 2



Para una sola partícula, Invertir el sentido del tiempo produce una segunda trayectoria, B, tan válida como la primera, A.



pero no el futuro? ¿La inversión de la flecha del tiempo permitiría ganar en cualquier apuesta o juego de azar? ¿Haría que las personas salieran de la tumba y rejuveneciesen hasta morir en el vientre de su madre? ¿Por qué albergamos esperanzas acerca del futuro, pero no del pasado? ¿Es la asimetría del tiempo la que impide los viajes al pasado? Resultan sugestivas, nadie lo discute, pero desprenden un cierto tufo a eslóganes publicitarios. Como estos, aluden al producto que pretenden vender, al paso que desvían la atención de su verdadera esencia.

La formación espontánea de un cubito de hielo en un vaso de agua tibia no pertenece a la misma familia de acontecimientos hipotéticos que un viaje al pasado o que recordar el décimo de lotería que saldrá ganador dentro de una semana. En el segundo caso, la imaginación humana exige a la flecha del tiempo más de lo que esta le puede ofrecer. Para evitar malentendidos, démosle la vuelta a la situación. Al constatar el desacuerdo que existe entre la simetría de las ecuaciones físicas y la asimetría de los fenómenos, un primer impulso nos lleva a buscar el error en las ecuaciones. Resulta clarificador cuestionarnos, en su lugar, qué supondría trasladar la simetría de las leyes a nuestra experiencia del tiempo. La operación exige examinar con más cuidado la conexión entre la dinámica de los fenómenos, tal como los percibimos desde nuestra subjetividad, con las ecuaciones que parecen desentrañar su funcionamiento.

Ambos términos producen la sensación de no hallarse al mismo nivel. Situamos en un plato de la balanza fórmulas matemáticas y, en el otro, una colección de impresiones. Las leyes de la física también son, sin duda, fruto de nuestra experiencia sensorial, pero pasadas por el tamiz de la lógica, que arma con ellas un cuerpo de relaciones metódico y sistemático. Las consideramos un producto más elaborado, donde el tiempo interviene como una magnitud medible. Asumimos que las leyes de Newton encarnan un cierto grado de objetividad y que inteligencias no humanas serían capaces de llegar a conclusiones semejantes, aunque las codificaran de otro modo. En cambio, podrían desarrollar un sentido del tiempo muy distinto del nuestro, como de hecho ha ocurrido en sociedades humanas aisladas.

## RIVALES EN EL ESPACIO Y EN EL TIEMPO

Isaac Newton fue pragmático a la hora de manejar las nociones de espacio y tiempo. Un exceso de escrúpulo le hubiera costado una vida de disquisiciones filosóficas que no le interesaban, así que cubrió el expediente a la manera de Euclides: aceptó como postulado lo que a primera vista parecía evidente. «El tiempo absoluto, cierto y matemático, fluye de manera uniforme por sí mismo y por su propia naturaleza, sin relación con nada externo». «El espacio absoluto, por su propia naturaleza, sin relación con nada externo, permanece siempre semejante e inmutable». A partir de ahí, y con el concurso de una inteligencia superdotada, derivó las leyes de la mecánica y la ley de gravitación universal. No obstante, bajo la superficie de lo evidente acechaban las arenas movedizas, en las que se hubiera hundido, a poco que se hubiera detenido en ellas.

### El ocaso del tiempo

Gottfried Leibniz, con otro gusto por la filosofía, no eludió el terreno pantanoso. Consideraba el espacio y el tiempo como categorías que crea la mente para organizar de manera eficaz las impresiones de los sentidos. El escenario donde se desenvuelven los fenómenos no tenía entidad real para él, se trataba de un mero andamio conceptual. Einstein manifestó en cierta ocasión su convencimiento de que Newton tampoco creía en el espacio y el tiempo absolutos que había propugnado en los *Principia*. Su postulación obedecía a una estrategia utilitaria, que le rindió frutos extraordinarios. Hoy en día se están llevando a cabo esfuerzos para eliminar el tiempo de las ecuaciones de la física y describir los cambios sin recurrir a ninguna referencia absoluta.



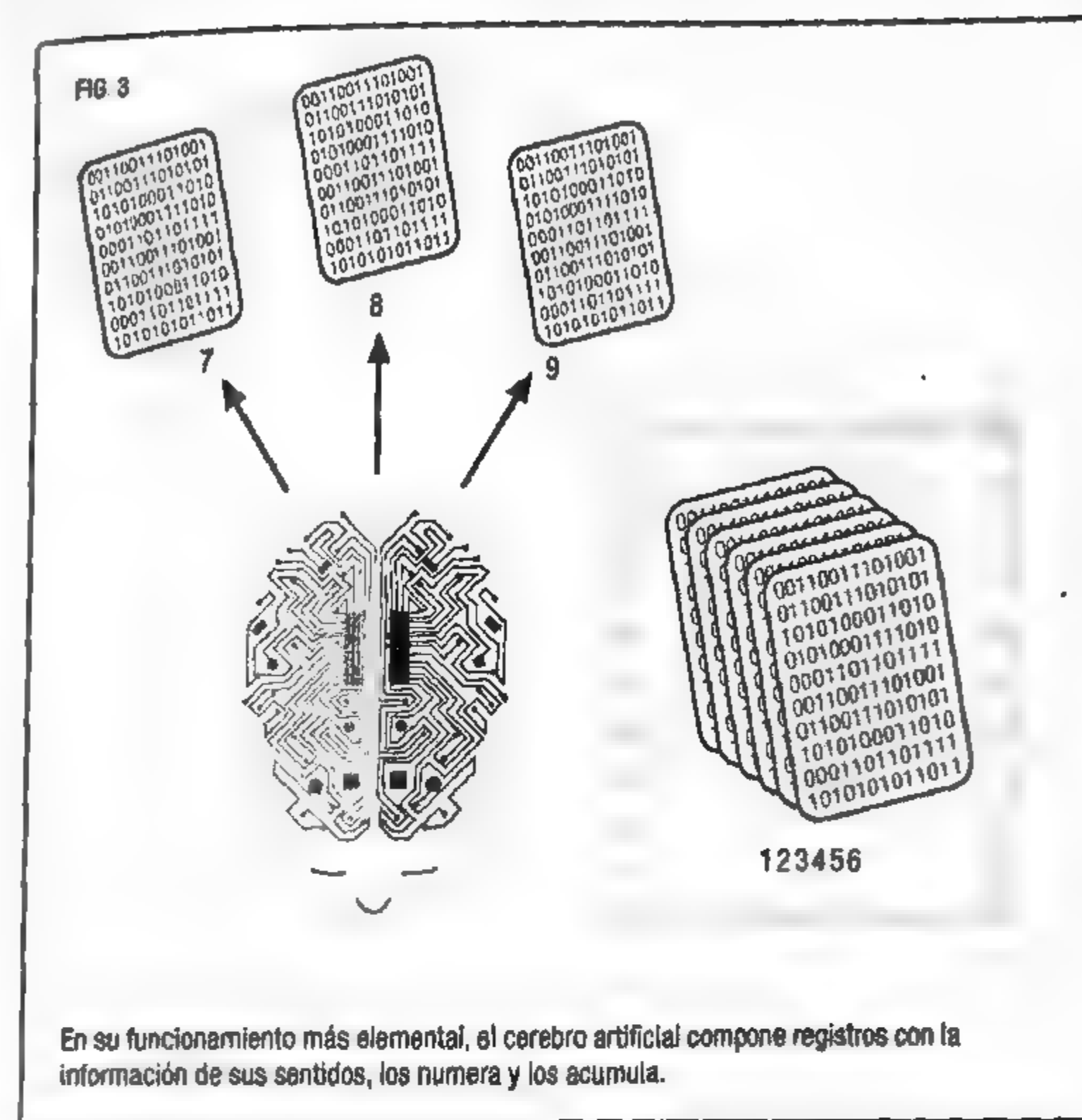
Newton (izquierda) y Leibniz: dos concepciones opuestas del espacio y el tiempo. ¿O no tanto?



Equilibrar los dos brazos de la balanza parece exigir un arriesgado ejercicio autorreferencial. ¿Cómo relacionar lo que pretendemos objetivo con lo que admitimos como subjetivo? Ya que tanto la sensación de que el tiempo fluye en un solo sentido como las ecuaciones son ambas construcciones de nuestra mente, al final, ¿no son las dos subjetividades, aunque de distinto grado? El cerebro ejecuta operaciones extremadamente complejas con la información, codificada en forma de impulsos eléctricos, que le llega de los sentidos. Todavía no hemos logrado desentrañar gran parte del proceso. Hasta la percepción temporal menos sofisticada, el presente, que acontece en lo que entendemos como un momento dado, es una interpretación, el resultado de evaluaciones que el cerebro efectúa a partir de experiencias tanto previas como inmediatas. Para soslayar gran parte de las dificultades, recurriremos a un modelo sencillo de mente subjetiva, que nos permita relacionar su experiencia del paso del tiempo con la magnitud que miden los relojes y que manejan las leyes de la física. Nos serviremos de una suerte de inteligencia artificial, el cerebro de un robot, con la esperanza de que su funcionamiento, muy simplificado, no traicione, en esencia, la complejidad de la mente humana.

## TIEMPO ARTIFICIAL

Supondremos que el robot dispone de una colección de sensores. Su cerebro recoge los datos que le envían y compone con ellos una pieza de información que los tiene en cuenta a todos: un registro. El primer cometido del robot se limita a producir y almacenar registros. A medida que los genera, los va numerando de forma correlativa: 1, 2, 3... Hasta aquí, no hemos hecho ninguna mención explícita del tiempo. Solo hablamos de registros que se crean a partir de los impulsos eléctricos que los sensores dirigen al cerebro artificial. Su acumulación encierra una promesa de memoria, aunque, de momento, el cerebro no es capaz de leerla ni de interpretarla. También hemos sentado las bases de una noción de presente: el último registro. Por ahora, la tarea



monótona del robot no le inspira ninguna sensación de paso del tiempo (figura 3).

Amplieemos las prestaciones de nuestro modelo. Instalémosle un software que le permita comparar registros, es decir, considerar cualquier pareja de registros y estimar si son iguales o distintos. También le capacitará para almacenar el resultado de las comparaciones y considerarlas cuando mejor le parezca. Con esta reforma, el robot adquiere una sensación rudimentaria de paso del tiempo. Para él consiste en la constatación de cambio. Si todos los registros que procesa fuesen idénticos, a pesar de que su actividad no cesaría, quedaría suspendido en una suerte de limbo temporal. En virtud de sus nuevas habilidades, el pasado comienza a materializarse: es el conjunto de registros



que ahora puede recorrer y examinar. El futuro resulta, empero, mucho más nebuloso. Carece todavía de entidad, más allá de la esperanza de que se seguirán produciendo registros.

Para rematar nuestro prototipo de cerebro artificial, dotémosle de la facultad de reconocer patrones en los cambios. De manera gradual, al estudiar su archivo de registros, el robot empieza a sacar conclusiones. Pasado un tiempo, aprende que después de cierta clase de registros suelen sobrevenir otros. Aquí, debemos aceptar implícitamente que el principio de causalidad rige en el universo del robot. Es decir, cualquier fenómeno que perciba se podrá explicar mediante una cadena ordenada de causas y efectos. Así y todo, asumimos que los fenómenos exhiben suficiente complejidad para desbordar su capacidad de análisis, de modo que no tendrá un conocimiento determinista del futuro. Si habitase en nuestro modelo clásico de universo, constituido por una colosal cantidad de partículas, no sería capaz de medir todas sus posiciones y velocidades en un momento dado o de resolver sistemas con trillones de ecuaciones.

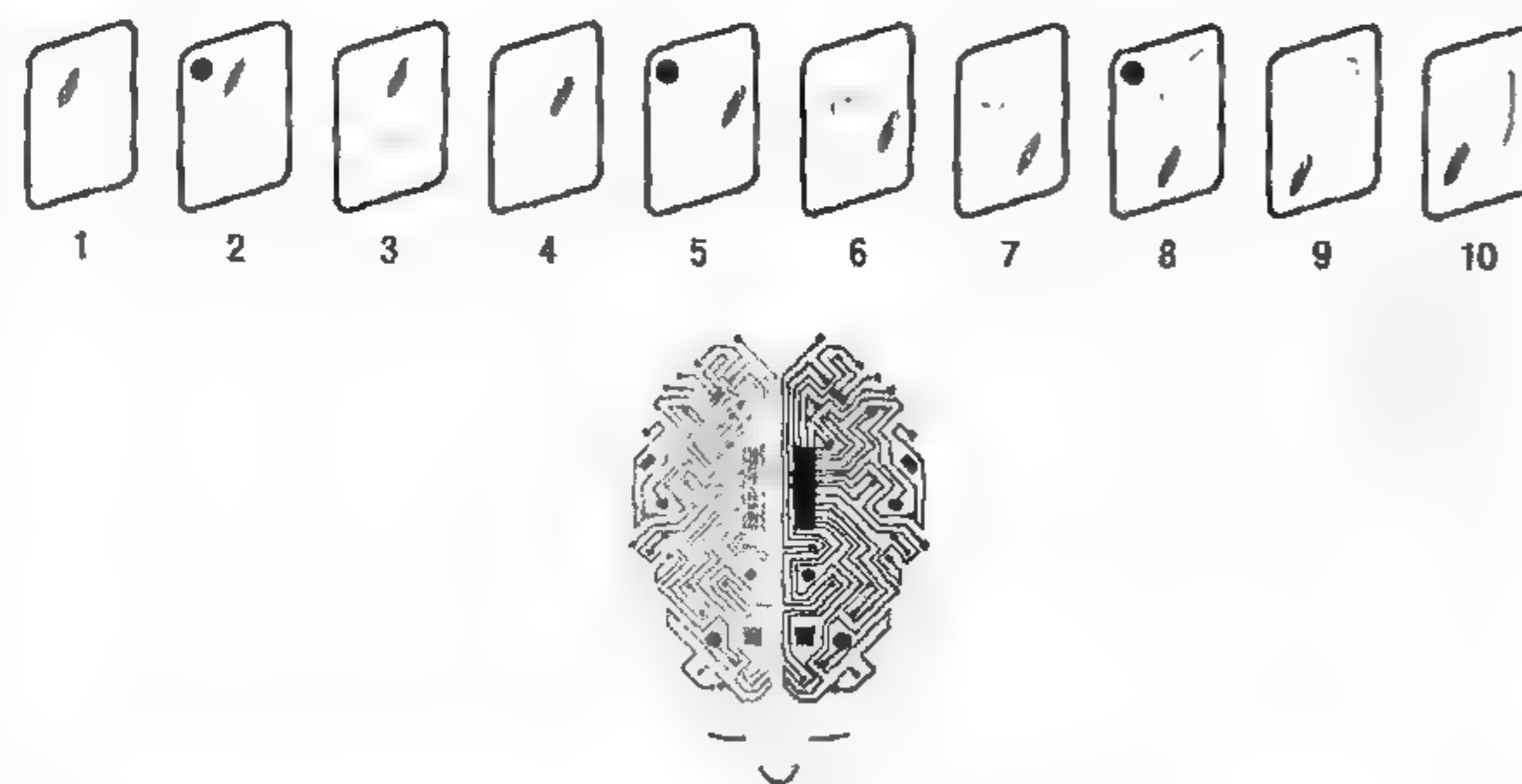
En la mente del robot, la masa informe de registros se organiza de acuerdo a una narración. La constatación de cambio opera ahora dentro de un contexto con amplias resonancias. En cuanto el pasado cobra sentido y estructura lógica, dando lugar a un relato, se hace posible levantar una expectativa sobre los registros venideros. Las relaciones causales aprendidas permiten deducir qué clase de registros pueden suceder al último que se procesa. Así se materializa el futuro. Por supuesto, podría ocurrir algo fuera del ámbito de la conciencia del cerebro artificial. Los sensores podrían dejar de recibir datos, aunque no sufran ninguna avería. Podría sobrevenir un apagón de «realidad» y que dejaran de generarse registros. Este accidente metafísico cae fuera del alcance de las leyes que el robot logre deducir sobre el funcionamiento de lo que él entiende por mundo, porque esa misma noción la ha construido exclusivamente a partir del análisis de los registros.

La sensación de paso del tiempo surge, por un lado, del análisis de unos registros a los que el robot encuentra sentido y que se integran dentro de una narración, formada por todos los registros anteriores (el pasado). Por otro, emana de la expectativa

que genera la producción ininterrumpida de registros y la lógica con la que se suceden (el futuro). El presente es siempre el último registro, que se convierte en pasado en cuanto otro registro lo desplaza y el cerebro lo incorpora al relato que conforman todos los que le precedieron.

Veamos ahora cómo puede el robot establecer una magnitud física temporal y relacionémosla con su percepción subjetiva del paso del tiempo. El tiempo físico es el tiempo que puede medir. Por simplificar, no tendremos en cuenta la contingencia de que el robot fabrique relojes sofisticados que le permitan aumentar la resolución de sus registros. Puesto que el tiempo fluye para la conciencia del robot solo cuando constata cambios, para construir un reloj necesita identificar algún fenómeno que varíe cíclicamente a lo largo de la serie de registros (figura 4). El equivalente humano sería la regularidad de las apariciones y desapariciones de los cuerpos celestes, de las oscilaciones de un péndulo o del pulso de la sangre.

FIG. 4



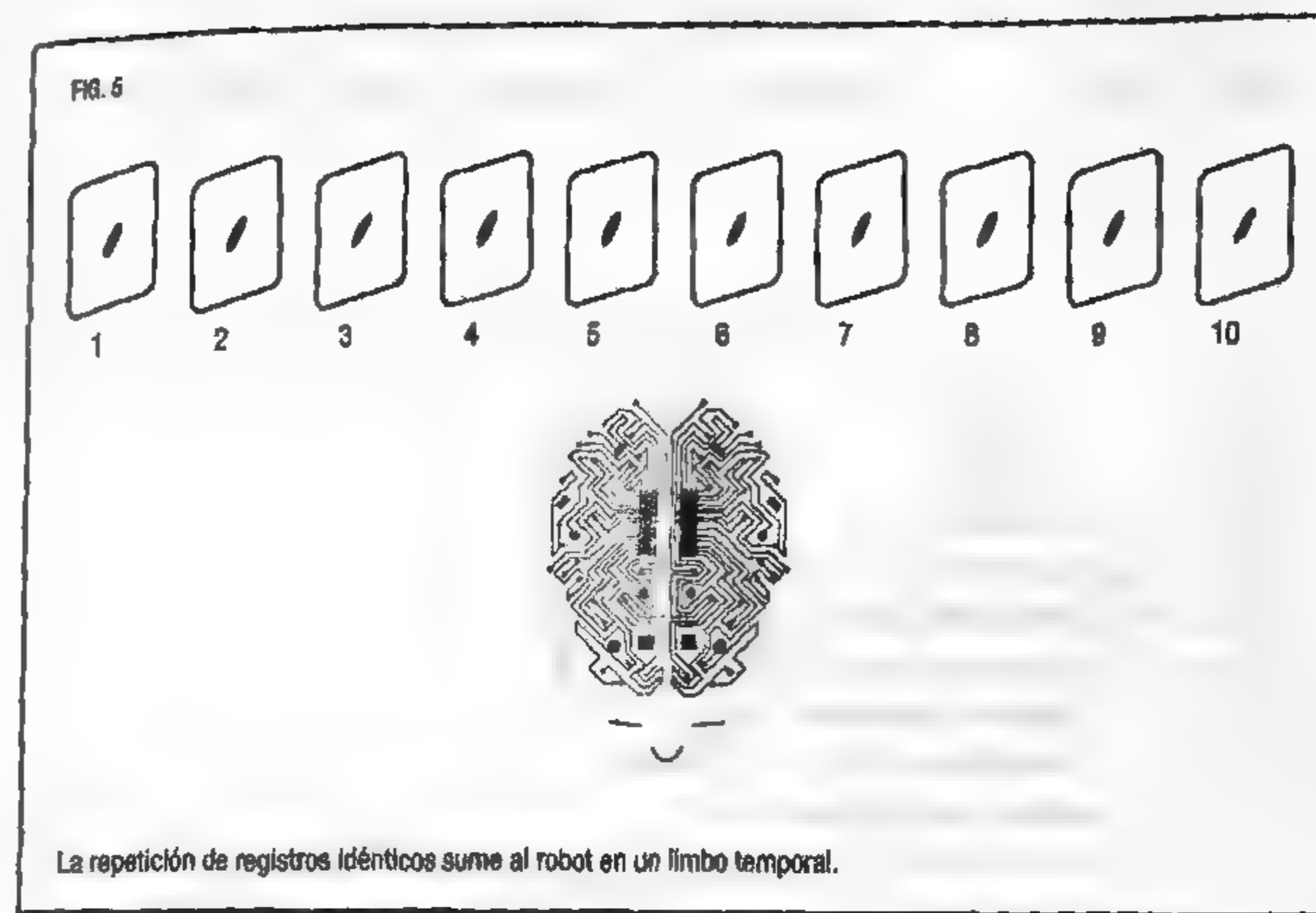
El cerebro artificial identifica un fenómeno periódico: la aparición del círculo oscuro en la esquina superior izquierda cada tres registros.



Como el tiempo fluye en la conciencia del robot a través de los cambios, una sucesión de registros idénticos pasaría desapercibida para él (figura 5). En ese caso, no tendría la sensación de que se ha congelado el tiempo, porque sus propios pensamientos también formarían parte del registro que se repite idénticamente. Hemos supuesto que las impresiones que le causan sus procesos mentales se integran con las sensoriales, a la hora de componer cada registro. De modo que ni siquiera le queda el recurso de comparar la numeración de dos registros iguales para verificar que uno se produjo antes o después que el otro, ya que la consulta no figura en el registro que copia con absoluta fidelidad los anteriores. Esta clase de repeticiones nos sitúan fuera del terreno cognoscible para el robot y no las tendremos en cuenta.

Una vez provisto de relojes, el robot lleva a cabo medidas cada vez más fiables. A partir de las medidas deduce leyes físicas, que utiliza para hacer predicciones más exactas sobre los fenómenos. Ha llegado el momento, por fin, de establecer una relación entre el tiempo subjetivo del cerebro artificial y el que figura como un símbolo en sus ecuaciones. La división de tiempo menor con sentido estrictamente empírico viene definida por el mínimo cambio perceptible: el paso de un registro al siguiente. La serie que numera los registros ofrece una escala de tiempos natural para el robot. En cierto sentido, ese es el tiempo real, puesto que es el que se extrae directamente de la experiencia. Por comodidad, el robot utiliza una variable  $t$  continua en sus ecuaciones, que considera valores de tiempo como 1,5 o  $\sqrt{2}$ , pero son abstracciones. El robot sabe que esos valores son meras extrapolaciones entre los tiempos empíricos que asocia a registros particulares. Recordemos que hemos descartado la posibilidad de que construya relojes más precisos, que acarrearían una división más fina del tiempo. El argumento general no prohíbe su existencia, siempre y cuando convengamos en que ningún dispositivo experimental sería capaz de una medición continua de tiempos. Esta condición, de naturaleza cuántica, rige en nuestro universo.

Al examinar la estructura de las ecuaciones físicas, el robot se da cuenta de que son simétricas respecto al tiempo, a pesar



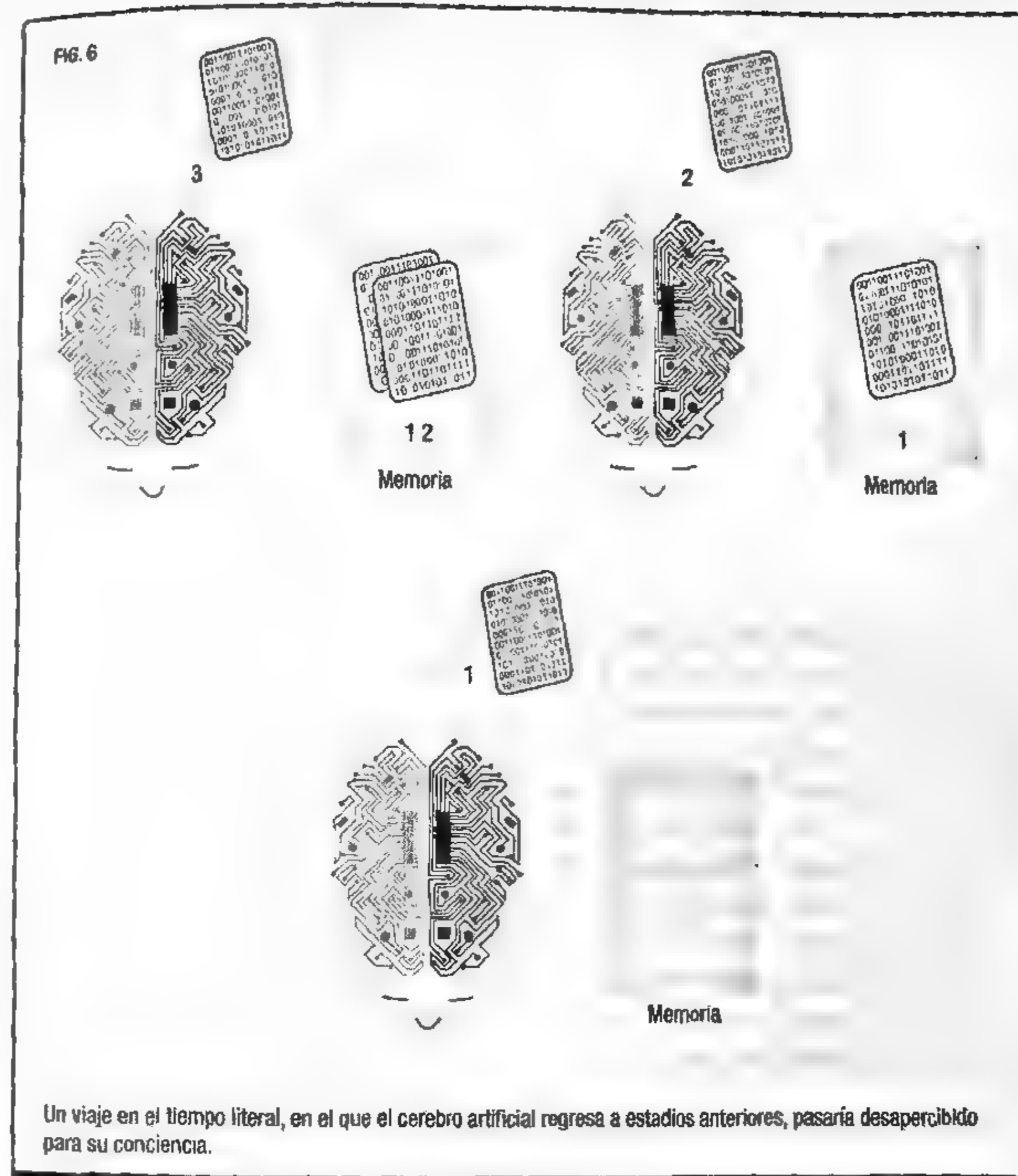
de que este corre para él en un solo sentido. Hay ciertas secuencias de registros, toleradas por las leyes que ha inferido, que nunca se producen. Acaba de tropezar con la paradoja de la flecha del tiempo.

En lugar de achacar el problema a las leyes de la física, planteémonos qué consecuencias traería una experiencia temporal simétrica para el robot. Supongamos que comparte la indiferencia de las ecuaciones acerca de si la variable temporal crece o decrece. ¿Significa que el robot puede dirigirse hacia el pasado o el futuro a sus anchas, viajar en el tiempo igual que se desplaza a través del espacio? ¿Analizará con la misma certidumbre los registros acumulados y los venideros? De entrada, hacer que la magnitud temporal disminuya en vez de aumentar implica destruir registros. El tiempo físico se asocia a cada registro y crece a medida que estos se acumulan. Si el tiempo retrocede, desaparecen registros. Veámoslo con un ejemplo. Fijémonos en un momento arbitrario en la vida del robot y convirtámoslo en el



origen de tiempos. El cerebro obtiene los registros 1, 2 y 3, todos diferentes. Una vuelta hacia atrás de la moviola destruye el registro 3 y lo sitúa de regreso en el 2. El robot no sería consciente del destrozo, porque su conciencia retrocedería un paso, al instante en que estaba procesando el registro 2 y todavía no se había producido el registro 3. La destrucción del registro 2 lo devolvería al instante 1. Su memoria mengua en el proceso (figura 6).

La expresión «destruir» puede dar a entender que el tiempo sigue su curso «fuera» de la conciencia del robot, igual que sucede con un enfermo que pierde la memoria mientras las personas de su entorno la conservan. Muy al contrario, el único tiempo que vamos a considerar es el asociado a un registro o a su versión idealizada, la variable  $t$ , es decir, el tiempo del robot. Aceptemos que la desaparición de los registros obedece a una operación más radical. Imaginemos un universo que solo habitan las inteligencias artificiales. La desaparición de registros sucede en todas ellas a la vez, merced a una perfecta sincronización. En este peculiar universo, nada impide a sus habitantes viajar en el tiempo, hacia delante o hacia atrás, igual que lo hacen en el espacio. Ahora bien, las reversiones son literales: en el proceso, las mentes también regresan a estadios anteriores y, por tanto, no constatan que se ha producido el retroceso. El fenómeno equivale a un rebobinado literal en la proyección de una película, donde cada fotograma es un registro. Si un proyccionista omnisciente jugase con la moviola e hiciera desaparecer los registros o reanudase su acumulación a voluntad, a partir de un instante cualquiera, sus acciones trasladarían la ambivalencia de las leyes físicas a la realidad. Habría una correspondencia exacta entre la creación y desaparición de registros y la dinámica descrita por las ecuaciones cuando el parámetro  $t$  crece o decrece. Todas las opciones contempladas por las leyes podrían acaecer. La progresión destructiva devolvería a cada partícula a su estado inmediatamente anterior, una y otra vez, revirtiendo de manera sostenida y tenaz su historia colectiva. Se podría verificar cada fenómeno y su inverso, cualquier conjunto de trayectorias y su imagen en el espejo. Sin embargo, esa simetría no se trasladaría a la percepción del robot. Aunque viviera inmerso en un curso de acontecimientos



perfectamente reversible y simétrico, su conciencia fluiría solo a través de la acumulación de registros y, por tanto, su experiencia solo se enriquecería en uno de los dos sentidos. Debido a cómo opera su mecánica cognitiva, a cómo elabora los conceptos de futuro y de pasado, para él la asimetría seguiría existiendo.

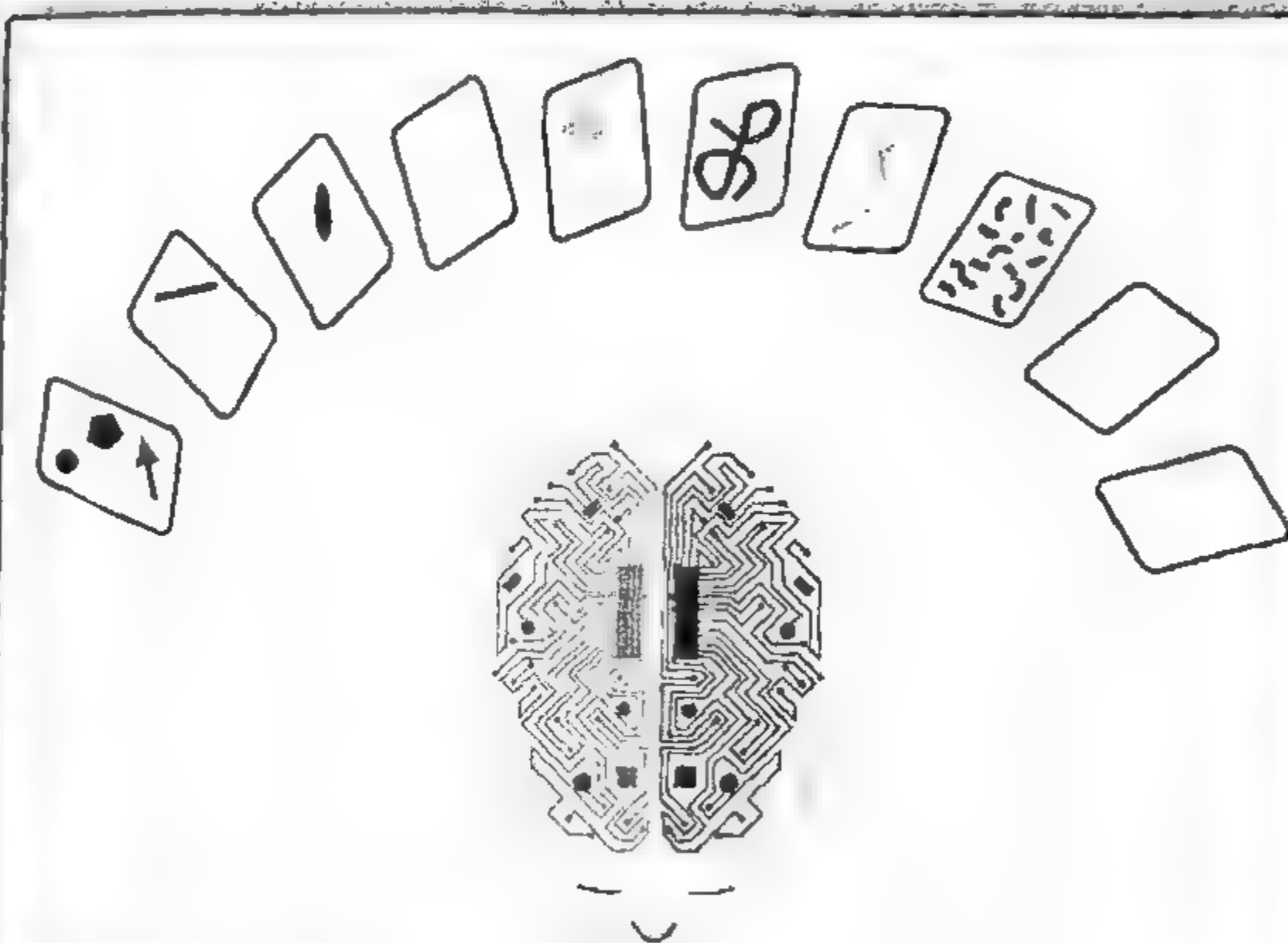


Dejándonos llevar por la analogía, bien podría ser el caso de nuestro universo. Si sufriéramos un rebobinado como el que en ocasiones se representa en las películas para denotar un retroceso en el tiempo, no nos percataríamos de que tiene lugar. Nuestra memoria y nuestra conciencia saltarían hacia atrás de fotograma en fotograma, hacia estados anteriores. Ir hacia el pasado no solo deshace el camino de las partículas que integran un huevo que se rompe o un cubo de hielo que se derrite. También deshace el camino de las partículas que participan en la creación de nuevas sinapsis cerebrales, de nuevos recuerdos. La memoria se va borrando al mismo ritmo que los huevos rotos se recomponen, la nieve abandona el suelo y sube hacia las nubes o los hielos cristalizan en el agua tibia. Quizá, sin darnos cuenta, viajamos en el tiempo, siguiendo rachas caprichosas, que ora soplan hacia el pasado, ora hacia el futuro. Se podría argüir entonces que no existe la flecha del tiempo. A veces rejuvenecemos, pero entonces también lo hacen nuestros recuerdos. No obstante, el sentido en el que se consolida nuestra experiencia y en el que podemos asimilar los registros coincide siempre con aquel en el que envejecemos y en el que la nieve cae. La asimetría no radica en el mundo, sino en nuestro proceso cognitivo.

Trasladar la reversibilidad de las ecuaciones fundamentales de la física a la dinámica de todas las partículas que componen el universo, sin excluir las que participan en los procesos mentales, nos obliga a admitir fenómenos cuyo acaecimiento seríamos incapaces de constatar. A lo mejor ocurren. No obstante, esta manera de solucionar el problema resulta insatisfactoria, porque lo vuelve trivial. De hecho, lo resuelve en un plano que cae fuera del alcance de la ciencia. No hay modo de decidir si las cosas suceden así o no mediante experimentos. ¿Por qué iban a producirse rebobinados? ¿Cuándo acontecen y con qué frecuencia? ¿Qué los causaría? Su realidad cae por completo fuera de nuestra jurisdicción sensorial y se nos presenta como una especulación inverificable. No hay modo de presentar pruebas tangibles a favor o en contra de su existencia. Deducirla de la mera simetría en las leyes físicas podría calificarse de un caso agudo de paranoia.

### TIEMPO SIN SENTIDO

El reconocimiento subjetivo de que el tiempo transcurre se apoya en una serie de registros con sentido. En un universo caótico, donde la única lógica fuera la que exhibe el funcionamiento organizado del robot, este adquiriría una noción muy pobre del paso del tiempo. Su conciencia se limitaría a constatar una sucesión de impresiones azarosas. Examinaría registro tras registro, incapaz de relacionar entre sí sus accidentes particulares. Ningún relato emergería de la acumulación anárquica de datos. No se establecerían patrones ni conexiones causales. Los relojes resultarían inviables. El robot tampoco podría deducir las leyes de la física. La falta de significado convertiría la constante variedad de los registros en la más perfecta monotonía. El análisis del archivo de memoria no promovería expectativa alguna acerca de los registros venideros. El futuro no ofrecería más entidad que la confianza en que el flujo de datos incoherentes no se interrumpirá. En esta situación, la flecha del tiempo se deevanece. La misma anarquía reina en los dos sentidos del tiempo. Da igual una película de registros que su versión rebobinada. Nada las distingue. El presente se convierte en el punto de inflexión de un caos simétrico, donde futuro y pasado se miran en el espejo.



Una serie continua de registros sin sentido desdibuja la flecha del tiempo.

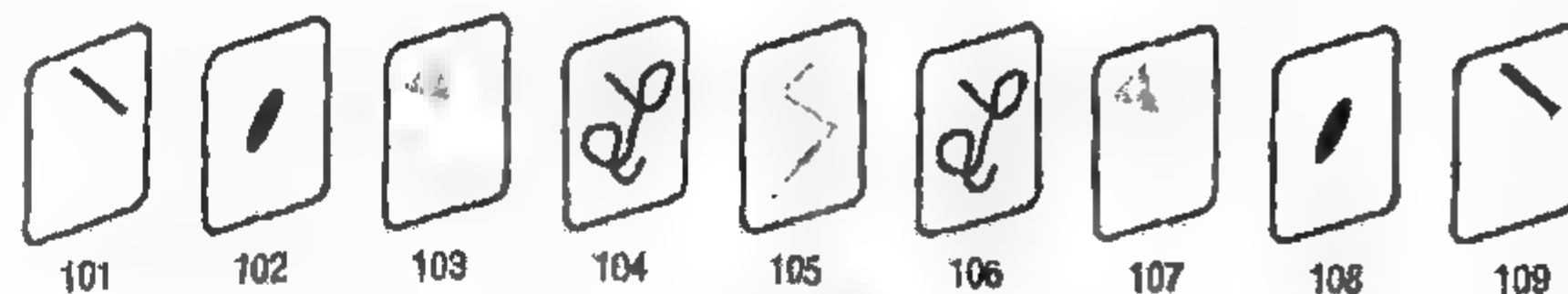


La enigmática desaparición de registros no es la única vía para que la inteligencia artificial se sumerja en un tiempo simétrico. ¿Y si la simetría se manifiesta en la composición de los registros? Tal circunstancia se daría al procesar una secuencia como la que se muestra en la figura 7.

En un instante dado, a partir del número 105, pongamos por caso, cada nuevo registro reproduce uno de los anteriores, en orden inverso, componiendo una secuencia simétrica. Si los registros 106 y 104, 107 y 103, resultan idénticos, volvemos al escenario que dibujaba la destrucción de registros. Aunque el registro 107 surja después del 105, retrata la conciencia del robot en el momento 103, cuando no había procesado todavía el 104 o el 105. El único modo de que el robot se percate de sus viajes en el tiempo es romper un poco el embrujo de la simetría. El registro 106 sería una réplica exacta del 104, salvo en un pequeño subconjunto de impresiones, las que corresponden a la actividad mental del cerebro artificial (figura 8). Todas las partículas invertirían sus trayectorias, excepto aquellas que sostienen con su actividad la conciencia del robot. Esta la blindamos, para que pueda ser testigo de lo que ocurre.

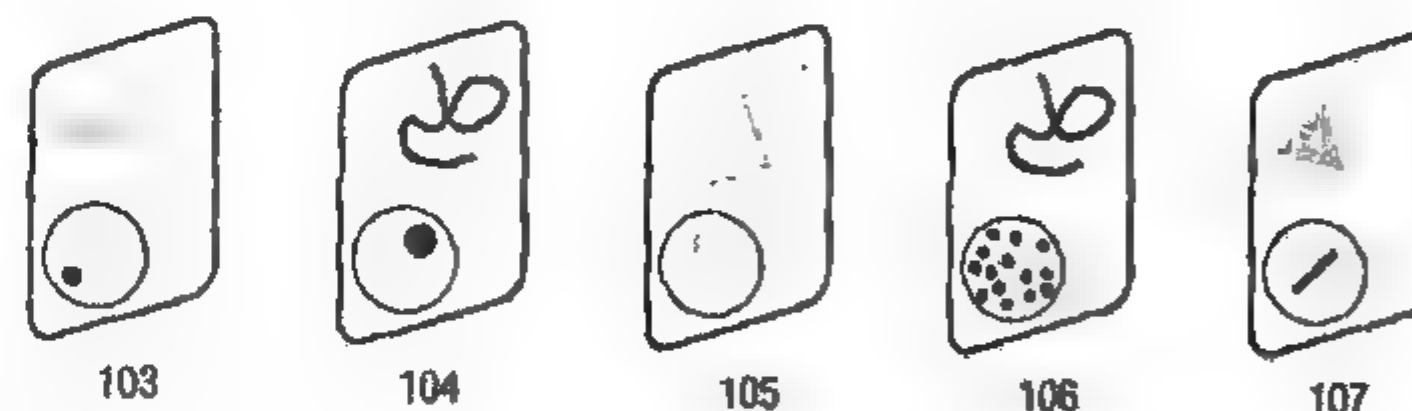
El parámetro que ordena los registros no deja de crecer, pero el robot recibe la impresión de estar yendo hacia atrás en el tiempo. Como conserva la capacidad de consultar su memoria, se da cuenta de que está incorporando registros nuevos que reproducen los antiguos, en un orden que invierte su experiencia anterior. Se está adentrando en el pasado. Nuestra fantasía es libre de ampliar o no el subconjunto de impresiones que no se ven afectadas por el rebobinado. Quizá la inteligencia artificial pierde por completo la libertad de movimientos y los registros que se invierten abarcan también sus impresiones táctiles y visuales. Viviría experiencias equiparables a las de una persona que camina de espaldas o extrae de su boca trozos de carne para componer sobre el plato un filete intacto. Existe otra posibilidad: que conserve su libre albedrío. El subconjunto de impresiones que mantiene su independencia se extiende del cerebro al resto del cuerpo. El robot contempla cómo la jarra de cristal que se rompió después de estrellarse contra el suelo

FIG. 7



La serie repite la secuencia de registros a partir del número 105, en sentido inverso. Como los registros incluyen la conciencia de la inteligencia artificial, esta no se da cuenta de que se ha producido la inversión.

FIG. 8



Mientras la porción de los registros que sustenta la conciencia del robot (englobada en el círculo negro) no se invierte, este podrá advertir que está viajando al pasado.



Nadie que utilice la misma palabra para referirse a *ayer* y *mañana* se puede considerar que tenga una firme noción del tiempo.

**SALMAN RUSHDIE, HIJOS DE LA MEDIANOCHE**

cumplen las mismas leyes de la física que dedujo antes de asistir a la cuenta atrás de los relojes.

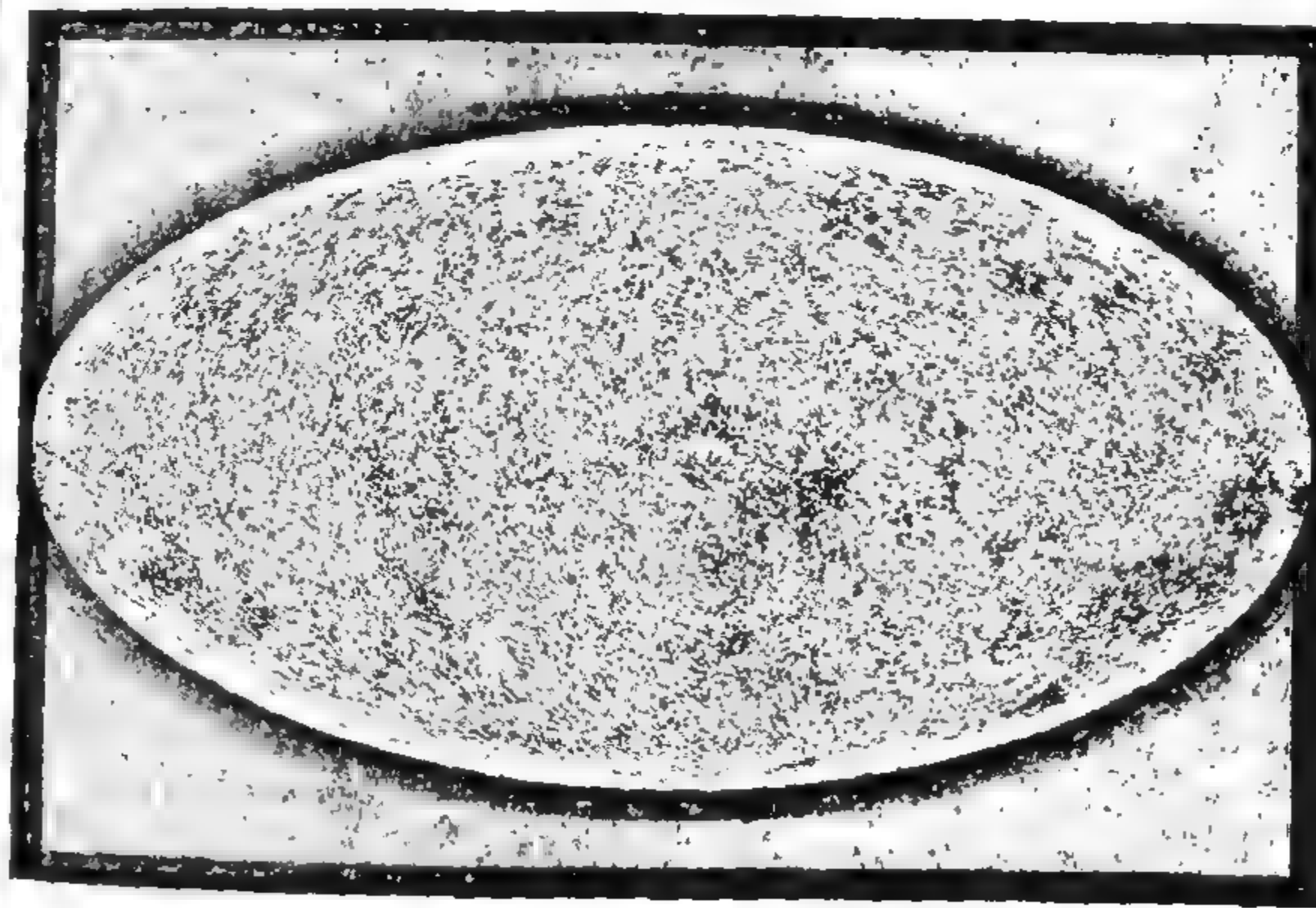
La primera alternativa contempla una premisa demasiado rebuscada. Si hasta ese momento el robot nunca ha perdido el dominio de sus actos, ¿por qué iba a hacerlo de repente? ¿Por qué esa privación se limita al cuerpo y no a sus pensamientos? Cabe extender el mismo reproche al segundo caso. La autonomía del robot, el subconjunto de impresiones que no sufre la reversión en cada registro, levanta una extraña barrera en ambos supuestos. ¿Por qué todos los fenómenos se rebobinan menos los que sustentan sus procesos mentales o sus movimientos? ¿Por qué las partículas que lo componen no participan de la inversión que afecta a las demás partículas del universo? En resumidas cuentas, ¿por qué su punto de vista es tan importante? Esta división entre el robot y el resto del mundo se antoja arbitraria. Y puestos a plantear arbitrariedades, ¿por qué, en un momento dado, los registros empiezan a plasmarse como réplicas de otros registros anteriores?

Buscar simetrías en nuestra experiencia del tiempo parece conducirnos a situaciones absurdas, en las que todas las partículas del universo invierten sus velocidades porque sí, excepto las que forman parte del observador, o en las que admitimos fenómenos fuera del alcance de la conciencia y de las propias leyes de la física. La imposibilidad de modificar el flujo subjetivo del tiempo no se corresponde exactamente con el sentido único que apunta la flecha del tiempo. Tiene que ver más bien con cómo construimos las nociones de pasado y futuro, con la mecánica con la que se registran en la memoria las impresiones, con cómo se procesan y con cómo se suscitan expectativas sobre las

se recompone saltando de vuelta a la encimera. El sol retrocede para ocultarse en el este. El mundo que habita muta ante sus sensores de un modo que invierte su sentido del paso del tiempo, pero él es libre de deambular en ese escenario a su antojo. Los fenómenos que observa, por cierto,

## REGISTROS NATURALES

Cualquier relato presupone una inteligencia que lo construya, pero la naturaleza mantiene su propio almacén de registros, al margen de que alguien se moleste o no en examinarlos o en componer una historia con ellos. Los anillos de los árboles guardan memoria de sequías y de lluvias torrenciales. Los fósiles atestiguan la existencia de ictiosauros, amonites y tempekyas, seres que poblaron un planeta que todavía no conocía el auge y declive de las civilizaciones. El código genético de los seres vivos contiene vestigios de infinidad de naufragios. Apuntes de ingeniosos diseños orgánicos y moleculares que acabaron en un callejón sin salida. Y de otros que imprimieron un giro inesperado al rumbo de la evolución. Minerales como la mica exhiben cicatrices microscópicas de pasadas desintegraciones radiactivas, producidas por pequeñas incrustaciones cristalinas de torio o uranio. El grosor creciente de los estratos sedimentarios certifica que en el Carbonífero los días fueron más cortos y que entonces la Tierra giraba más deprisa. La lava petrificada preserva sus partículas de óxido orientadas hacia un polo norte que ahora ocupa el polo sur, cuando el campo magnético de la Tierra estaba invertido. Los meteoritos conservan en sus entrañas los ingredientes primigenios del sistema solar. La propia luz de las estrellas nos enseña su pasado, más remoto cuanto más distantes. La radiación cósmica de fondo es el registro más antiguo que conocemos, una instantánea del universo unos 380 000 años después del Big Bang. Quizá algún día las ondas gravitatorias nos enseñen un mundo más joven todavía.



El registro más antiguo conocido del universo: la radiación de fondo de microondas.



impresiones que vendrán. El funcionamiento, en esencia asimétrico, de esta cadena de montaje cognitiva presenta peculiaridades que no atañen al problema general. Podríamos centrar la atención en otros sistemas que, al igual que nuestra conciencia, no se sustentan en procesos reversibles. Invertir la experiencia humana del flujo del tiempo exige un itinerario muy específico a todas las partículas del universo bajo nuestro escrutinio. Esto no implica que nuestra razón opere al margen de las leyes de la física o que la propia evolución del universo no condicione su existencia.

Dar por sentado que la simetría temporal debería abrirnos las puertas del pasado refleja una obsesión antropocéntrica por la historia particular de una gran asamblea de partículas: aquellas que constituyen nuestro cuerpo y nuestro entorno. Impone la simetría de las leyes, una propiedad general, a una serie muy particular de concatenaciones causales. No hace falta obligar al universo entero a moverse al unísono, orquestando coreografías monstruosas con el único fin de satisfacer a los espectadores humanos, para que regresen a un verano dorado de su infancia o cumplan el sueño de ganar siempre a la lotería. La paradoja de la flecha del tiempo no ampara esta exigencia desmesurada, que procede más bien de ciertas expectativas que cautivan nuestra imaginación.

Con todo, las partículas podrían propiciar fenómenos colectivos que nunca advertimos, que no deshacen paso a paso la historia del universo y que, sin embargo, pondrían de manifiesto la reversibilidad de las leyes que las gobiernan. Sucedería en el caso de que las moléculas de un gas se concentraran espontáneamente en la esquina de una habitación. O si los átomos desertaran del orden que les imponen las estructuras materiales con la misma frecuencia con que se someten a él. En un mundo que ejercitase toda la libertad que prometen las ecuaciones físicas, la armonía brotaría gracias al azar y se perdería por su culpa. Del polvo y el gas interestelar surgirían extrañas estructuras, fugaces, cuya organización se desharía, más pronto o más tarde, en un instante tan arbitrario como el que las originó. No podría armarse ninguna narración con sentido. Ninguna noción de progreso. De he-

cho, nadie establecería distinciones entre orden y azar. Nuestra mente no tendría lugar. O, si la casualidad la fraguara, sería tan efímera como una burbuja.

Planteada en estos términos, la paradoja de la flecha del tiempo se interroga acerca de la arquitectura y la historia del universo. ¿Por qué existen los púlsares y el ADN? ¿Por qué no impera un caos indiferente? ¿Por qué el universo evolucionó a través de una determinada sucesión de episodios, que componen un vastísimo relato, que infinidad de pequeñas o grandes reversiones espontáneas no han deshecho? ¿Por qué han cuajado las estructuras complejas y han perseverado?

Estas incógnitas llamaron la atención de algunos de los físicos más brillantes del siglo XIX, entre ellos Ludwig Boltzmann, Josiah Willard Gibbs y James Clerk Maxwell. En opinión de algunos, lograron zanjar la cuestión. Según otros, solo plantaron los cimientos de la verdadera solución, que precisa el concurso del Big Bang, que entonces se desconocía. Para unos pocos, la esencia del problema, una vez más, estaba en otra parte.



## El tiempo y el azar

La primera solución al enigma de la flecha del tiempo parecía apuntar a la segunda ley de la termodinámica. Este principio, uno de los más importantes de la física, encierra una profunda asimetría, que no parece asomar en las ecuaciones fundamentales.



La flecha del tiempo evidencia una asimetría en la naturaleza que las ecuaciones fundamentales de la física no parecen dispuestas a sustentar. Tan incómoda discrepancia no resulta del todo original, puesto que late en el corazón de una rama de la ciencia que presume ya de una tradición secular: la termodinámica. Esta disciplina aporta a nuestra búsqueda un equilibrio singularmente atractivo. Por un lado, no desmiente las leyes fundamentales y, por otro, surgió del estudio de una asimetría que, en principio, no se identificaba en ellas. ¿Encierra por tanto la clave del misterio?

La termodinámica planta cara a la complejidad del mundo. Trata con sistemas macroscópicos, es decir, aquellos cuyas propiedades se definen a la escala que aprecian los sentidos humanos. Las leyes fundamentales mantienen una relación más distante con ellos. Exhiben ciertos resabios aristocráticos, si se quiere, tratan con una o dos partículas, o con media docena, mientras que la termodinámica no rehúye los baños de multitudes. Y aquí la noción de multitud no se aplica a miles o decenas de miles de partículas, sino a cuatrillones o más. Las leyes fundamentales operan sobre los ingredientes últimos de la materia, la luz o la radiactividad. Los físicos las aplican en situaciones ideales,



donde unas pocas partículas escogidas se aíslan del entorno, o sobre objetos que, bajo determinadas circunstancias, se pueden considerar mucho más sencillos de lo que son en realidad. Estas simplificaciones apuntan a la esencia de los fenómenos, pero no sirven para desentrañar el espectáculo de la diversidad. Un planeta se puede suponer puntual si se quiere estudiar su órbita, no si se pretende explicar su clima. La atmósfera terrestre incorpora más de cien trillones de cuatrillones de moléculas (un uno seguido de cuarenta y cuatro ceros). Aun cuando el movimiento de cada una de esas moléculas obedeciera una ley bien conocida, nadie sabría manejar una cantidad tan desmesurada de variables. Tampoco se pueden medir las velocidades y las posiciones de cada una de las partículas del aire e introducir sus valores en las ecuaciones. Por supuesto, las leyes fundamentales describen con precisión el comportamiento de cualquier sistema, por complejo que sea. Como herramientas de análisis, sin embargo, se vuelven inservibles para los seres humanos en la mayoría de las situaciones. Cabe imaginar que una inteligencia con una capacidad de cómputo muy superior lograría comprender el clima desde una perspectiva elemental. No es nuestro caso.

Investigar la evolución de una asamblea de trillones de moléculas exige un cambio de estrategia. Hay que descartar las variables que especifican su dinámica individual en favor de otras que reflejen su comportamiento colectivo, como la presión, el volumen o la temperatura. Estas últimas se ligán en nuevas ecuaciones, que expresan leyes originales. Establecerlas fue uno de los primeros logros de la termodinámica, aunque no nació con ese propósito declarado, puesto que se desarrolló antes de que los físicos adquiriesen una imagen clara del ámbito atómico. El lema de la termodinámica primitiva fue extraer la máxima información posible de la materia ignorando por completo los detalles acerca de su estructura interna. Las leyes fenomenológicas precedieron a las leyes fundamentales. Conceptos como la temperatura, el volumen y la presión eran de uso común mucho antes de que se concibiera su interpretación microscópica. A mediados del siglo xvii, el trabajo experimental de Robert Boyle y Robert Hooke en Oxford ya había establecido que, a una tempe-

ratura dada, el volumen y la presión de un gas son inversamente proporcionales. Cien años después, Joseph Black inauguraba la ciencia de la calorimetría y Johann Heinrich Lambert investigaba con rigor matemático la conducción del calor en los sólidos. Las imágenes atómicas con una resolución aceptable tuvieron que esperar hasta entrado el siglo xx.

## MAQUINAS IMPERFECTAS

La termodinámica ha terminado por interrogarse acerca del universo en su totalidad, pero nació con pretensiones más modestas. En sus inicios, su curiosidad se limitó al funcionamiento de la máquina de vapor y muchos de sus pioneros fueron ingenieros, como Sadi Carnot, William Thomson o Émile Clapeyron. La empresa en la que se embarcaron tampoco carecía de ambición. La revolución industrial había cobrado impulso y necesitaba una nueva fuerza motriz para despegar. El aumento de la producción en las minas, en las fábricas textiles o siderúrgicas no se podía sostener con la sola fuerza de los hombres, los animales, el viento o el agua. Antes del advenimiento de la electricidad, las esperanzas se depositaron en el vapor de agua. Las máquinas térmicas abrían la posibilidad de un trabajo más eficiente, estable y controlado. Liberaban además de ataduras geográficas y meteorológicas, ya que se podían construir y explotar en cualquier momento y lugar. Se cultivó así el arte de sacar el máximo rendimiento dinámico al calor: la termodinámica. Su mito fundacional se suele fijar en la publicación de *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego*, en 1824. Su autor, Sadi Carnot, un joven ingeniero militar, quedó conmocionado al presenciar la entrada en París de un ejército extranjero, hito aciago que los franceses no habían conocido en cuatrocientos años. Convencido de que la derrota de Napoleón obedecía en gran medida a su inferioridad industrial, Carnot se propuso remediarla. Con este fin, quiso asentar el estudio de las máquinas térmicas sobre una base tan sólida como la que fundaba el funcionamiento de las grúas, las palancas o cualquier caja de engranajes, que se podían diseñar con tiralíneas gracias a las leyes de Newton.



Quitarle hoy a Inglaterra sus máquinas de vapor sería [...] arruinar todos sus medios de prosperidad; sería aniquilar esta colosal potencia.

SADI CARNOT, REFLEXIONES SOBRE LA POTENCIA  
MOTRIZ DEL FUEGO

Las máquinas térmicas extraían su fuerza de un agente más enigmático e inaprensible que los engranajes, las palancas o las poleas. En aquel entonces ni siquiera estaba clara la identidad del calor, que se tomaba por un fluido. Las máquinas de vapor de Thomas Savery, Thomas Newcomen o James Watt se basaban en observaciones perspicaces, inspiraciones afortunadas y el acostumbrado juego de ensayo y error. Carnot procuró abstraerse de elementos accesorios, como las fugas térmicas o la falta de ajuste entre pistones y cilindros. Estaba convencido de que las deficiencias de esa naturaleza se irían puliendo con el roce de la experiencia. Aspiraba a determinar cuál era la máxima potencia que se podía alcanzar en teoría, dejando de lado diseños particulares. ¿Dónde estaban, si existían, los verdaderos límites de la tecnología del vapor? Concibió así el prototipo de máquina térmica, un artificio ideal cuyo rendimiento perfecto emularían los mecanismos reales. Lo que encontró fue que hasta el modelo más consumado tenía limitaciones. ¿A qué se debían?

Carnot no llegó a conocer la respuesta. Su vida concluyó de forma prematura, a la edad de treinta y seis años, víctima de una epidemia de cólera. Como medida de asepsia, gran parte de sus cuadernos de trabajo ardieron en la misma pira que consumió su cuerpo. Ironías del destino, el testigo de su patriótica investigación fue recogido por ingleses y prusianos, como James Prescott Joule, Rudolf Clausius y William Thomson, entre otros. El primer hito que establecieron fue la ley de conservación de la energía. A estos investigadores les traía sin cuidado el problema de la flecha del tiempo, pero el estudio de las máquinas térmicas les condujo a la consideración de otra asimetría igual de intrigante. No todos los procesos en los que se conserva la energía se dan en la naturaleza. En particular, constataron un patente desequilibrio en la sístole y diástole que hacía latir a la máquina de vapor: la transformación de calor en trabajo, y viceversa. Ahí residía la tara que apartaba a la máquina ideal de Carnot de la perfección.

Las máquinas térmicas extraían su fuerza de un agente más enigmático e inaprensible que los engranajes, las palancas o las poleas. En aquel entonces ni siquiera estaba clara la identidad del calor, que se tomaba por un fluido. Las máquinas de vapor de Thomas Savery, Thomas Newcomen o James Watt se basaban en ob-

## EL CÓDIGO DEL UNIVERSO

En principio, el código de la termodinámica es escueto y se reduce a tres leyes, pero su jurisdicción bien podría ser universal. Regulan lo que sucede en sistemas aislados, es decir, libres de inferencias externas de cualquier clase. A continuación, se presentan algunas de sus formulaciones más célebres.

### Primera ley

«La energía siempre se conserva». «La energía ni se crea ni se destruye, tan solo se transforma». «No se pueden construir máquinas de movimiento perpetuo de primera especie» (aquellas que realizarán trabajo sin consumir energía).

### Segunda ley

«Cuando dos cuerpos a distintas temperaturas se ponen en contacto, el calor siempre fluye del más caliente al más frío». «La entropía de un sistema solo puede permanecer constante o aumentar». «En cualquier transformación de energía una parte se disipa y no se puede aprovechar para producir trabajo». «Cualquier sistema tiende a evolucionar hacia el macroestado con más microestados». «No se pueden fabricar máquinas de movimiento perpetuo de segunda especie» (aquellas que exhiben una plena eficiencia energética).

### Tercera ley

«Ningún sistema puede alcanzar una temperatura de cero grados absolutos».

Las tres leyes se han formulado también como: 1) No puedes ganar. 2) Tampoco puedes empatar. 3) Ni siquiera puedes abandonar la partida. A esta terna se ha incorporado, a modo de preámbulo, una ley cero: «Si un sistema A se encuentra en equilibrio térmico con otro sistema B; y, a su vez, B se halla en equilibrio con un tercero, C; entonces A está en equilibrio térmico con C».

La ilustración, de Norman Rockwell, sirvió de portada al número de octubre de 1920 de la revista *Popular Science*. Muestra a un inventor en su taller, mientras contempla perplejo una máquina de movimiento perpetuo.





Pero si se descubre que tu teoría contradice la segunda ley de la termodinámica, no puedo ofrecerte esperanza alguna; colapsará sin remedio del modo más humillante.

ARTHUR EDDINGTON

Antes de proseguir, conviene precisar el sentido que adquieren términos como «calor», «trabajo» o «temperatura» en boca de un físico. La temperatura expresa la energía que poseen los átomos o las moléculas en virtud de su movimiento. En un lenguaje más técnico, es una magnitud proporcional a la «energía cinética», que refleja tanto la velocidad como la masa de las partículas. Se trata de una propiedad colectiva: lo que miden los termómetros son valores medios que corresponden a una colosal congregación de moléculas. Las moléculas de vapor no participan en ningún desfile, cada una circula a una velocidad. La de la mayoría se aproxima mucho a la media y las que lo hacen más deprisa se ven compensadas por las que lo hacen más despacio. El calor entra en juego cuando la energía cinética media aumenta o disminuye, algo que puede ocurrir por causas de diversa índole, como colisiones con otras moléculas o la absorción o emisión de radiación electromagnética. En principio, cualquier interacción fundamental podría afectar al movimiento de las partículas, ya sea la acción de la gravedad o una desintegración nuclear, pero, en aras de la simplicidad, omitiremos tales eventualidades. En realidad, tampoco tendremos en cuenta la radiación electromagnética, porque su encaje dentro del programa termodinámico nos sacaría de la física clásica. Nos limitaremos, pues, a considerar gases ideales, poco densos, cuyas moléculas interaccionan de forma esporádica mediante colisiones. Dentro de estos límites, el calor se reduce a una mera transferencia de energía cinética. Cuando un grupo de partículas en promedio más rápidas o más masivas entra en contacto con otro grupo de partículas más lentas o ligeras, las primeras distribuyen su exceso de energía entre las segundas mediante choques. Así se alcanza un segundo equilibrio, con nuevos valores medios. Ese proceso de reajuste colectivo se describe en el lenguaje arcaico de la primera termodinámica como un «flujo de calor».

Pasemos ahora al segundo término de la asimetría: el trabajo. La expresión se aplica en situaciones en las que un cuerpo se

desplaza bajo la acción de una fuerza. Si asumimos la perspectiva utilitaria de los fundadores de la termodinámica, su significado se vuelve transparente. Lo que ellos pretendían era obtener acción mecánica: alzar un peso, impulsar un telar, moler grano, bombear agua, desplazar barcos o vehículos terrestres, labores confiadas durante siglos a animales de carga, a seres humanos, a la fuerza del viento o al curso de los ríos. El trabajo, como el calor, supone una transferencia de energía. El defensor de una fortaleza que alza una pesada piedra hasta lo alto de sus muros deja allí almacenada una energía, llamada «potencial», que podrá transformar a su vez en energía cinética, como comprueban los infortunados asediados sobre los que la deja caer. En tiempo de paz, el guerrero puede aplicar sus esfuerzos a fines más constructivos. Si ata la piedra a una cuerda enrollada en torno a un eje, su caída lo pondrá en movimiento. Unas palas encajadas en el eje podrían batir un gas y sus golpes contra las moléculas las animarían, aumentando su temperatura. No hay modo de distinguir ese gas de otro que se haya caldeado mediante el contacto leve con una llama.

La máquina de vapor funciona como un transformador de flujos de energía. El que entra lo hace merced al calor y el que sale, merced al trabajo. En esencia, el mecanismo opera al evaporar agua en una caldera y explotar su presión para producir movimiento. Clausius y Thomson compendiaron las observaciones de Carnot en una máxima: ninguna máquina térmica que actúe de forma sostenida puede convertir todo el calor que genera en trabajo mecánico. Tan categórico argumento devino en decreto universal y en uno de los posibles enunciados de la segunda ley de la termodinámica. Vista bajo el ángulo adecuado, supone la constatación de una asimetría, puesto que nada impide que todo el trabajo de una máquina se disipe en forma de calor. El físico y escritor inglés Charles Percy Snow juzgaba que la ignorancia de la segunda ley debía penalizarse, en una prueba de cultura general, con el mismo bochorno que no conocer ninguna obra de Shakespeare. Quizá el bardo de Stratford estaría de acuerdo con Snow, ya que la segunda ley protagoniza veladamente muchos de sus versos, en los que lamenta la implacable erosión del tiempo. Dada su importancia, merece la pena que examinemos con más

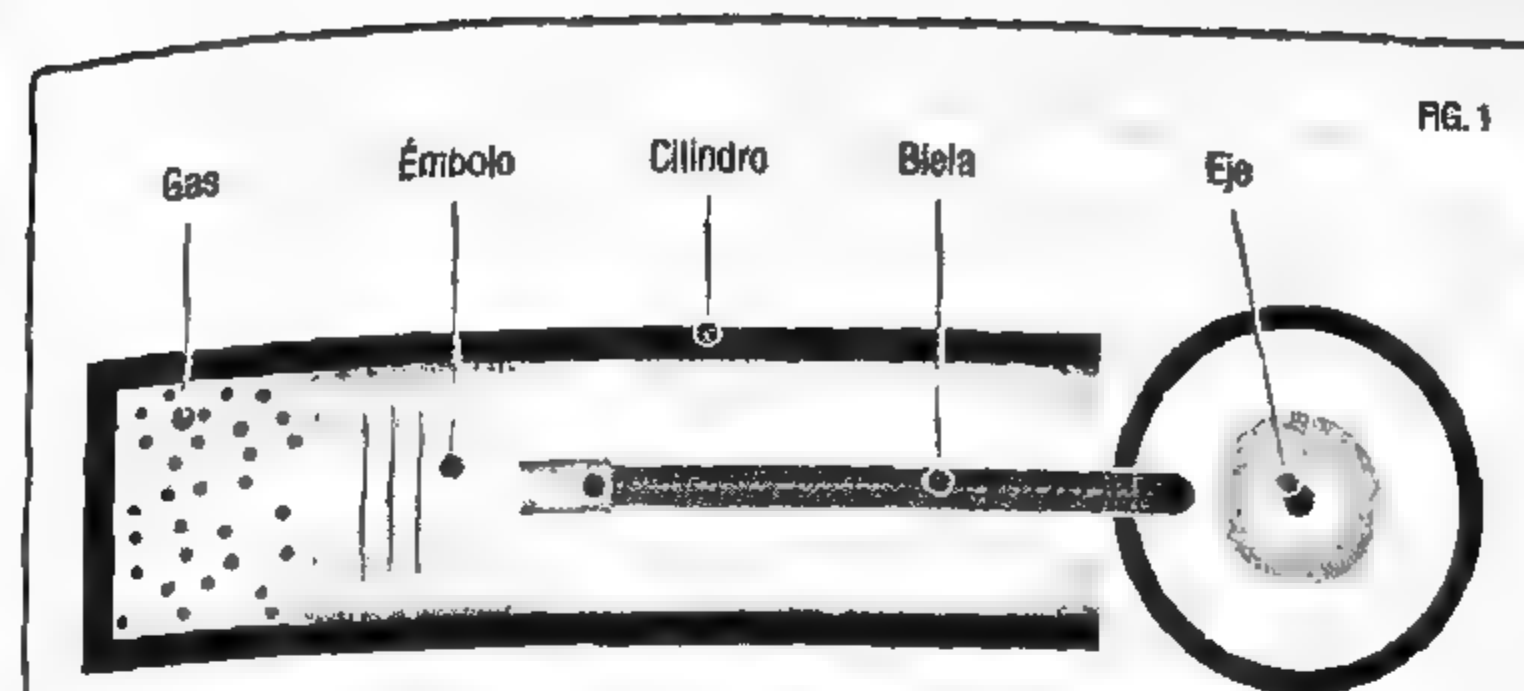


cuidado qué estorba la mudanza del calor en trabajo, mientras que la conversión inversa, del trabajo en calor, no encuentra ninguna traba.

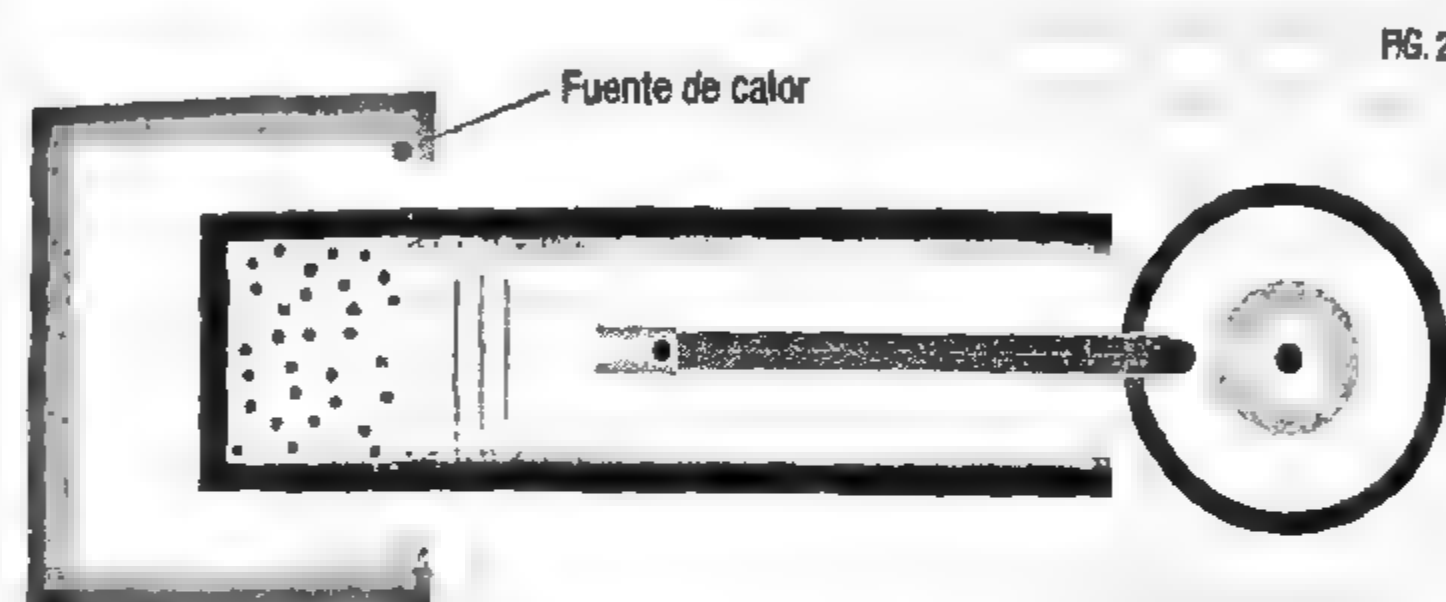
La figura 1 muestra el diseño de una máquina de vapor elemental. Consta de un cilindro herméticamente cerrado, con una de sus paredes móvil: un émbolo. El tubo contiene un gas, que será el encargado de llevar a cabo el trabajo. El émbolo se conecta a una biela, un ingenioso mecanismo que transforma su vaivén horizontal en un movimiento de rotación. Este último se comunica a un eje, que podrá animar la muela de un molino o las ruedas de un vehículo.

Durante la primera etapa del funcionamiento de la máquina, el cilindro se pone en contacto con una fuente de calor, cuya temperatura, superior a la del gas, se mantiene constante (figura 2). De esta forma, subimos la temperatura del gas y después vamos introduciendo en el sistema la porción de energía que esperamos convertir en trabajo. Concluida la inyección energética, aislamos el cilindro. Al aumentar la energía cinética de las partículas del gas, estas chocan con más brío contra las paredes del cilindro y ejercen una mayor presión sobre ellas. En principio, el gas exhibe una absoluta simetría. Sus partículas no manifiestan preferencia por ninguna dirección del espacio. En promedio, hay tantas moléculas corriendo en un sentido determinado como en el contrario. El diseño de la máquina, sin embargo, rompe la simetría. Todas las paredes aguantan la acometida del gas, excepto la que es móvil. El émbolo cede bajo la presión de las moléculas que, por azar, viajan hacia la derecha y se desplaza, impulsando la biela y el giro del eje.

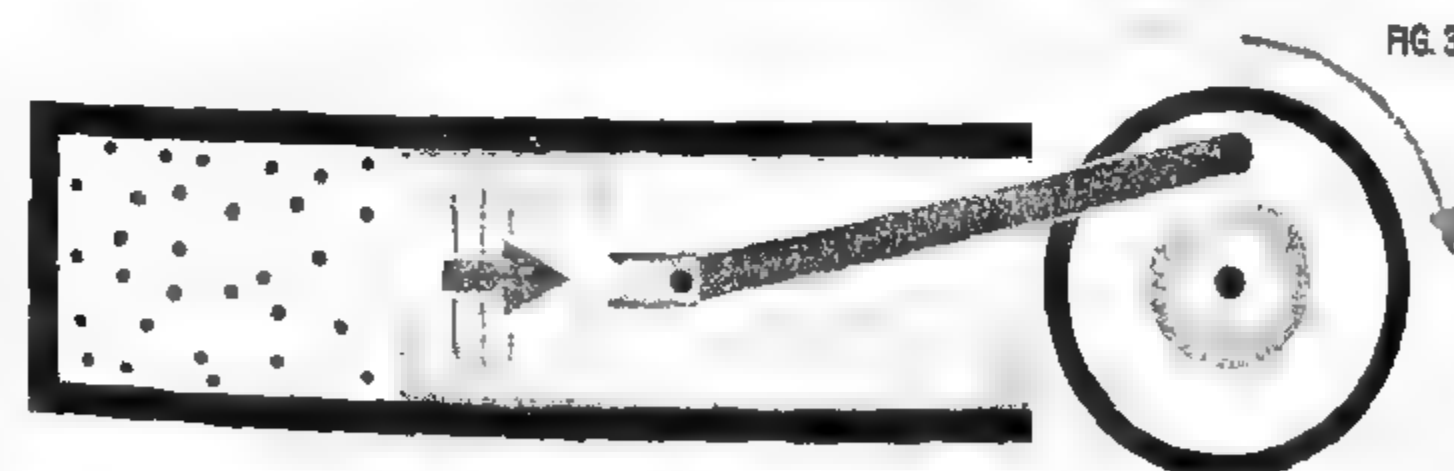
A medida que se amplía el volumen, se va desinflando la presión. Las moléculas tienden a ocupar todo el espacio disponible y muchas de las que antes chocaban contra el émbolo ahora lo hacen contra las nuevas porciones de tubo que han quedado descubiertas. Después de que se aisle el cilindro térmicamente, también baja la temperatura del gas, porque las moléculas que chocan contra el émbolo pierden la energía que le comunican para desplazarlo y ya no cuentan con la fuente de calor para reponerla. Llega un momento en que el émbolo se detiene (figura 3). Podríamos pen-



Diseño de una máquina de vapor elemental. En condiciones ideales, no se produce ninguna fricción entre el cilindro y el émbolo cuando este último se desplaza.



Primera etapa. Al poner el gas en contacto con materia más caliente, sube su temperatura hasta  $T_1$  y se expande, desplazando el émbolo hacia la derecha. La expansión debería enfriar el gas, ya que, para mover el émbolo, le transfiere parte de su energía cinética media. Sin embargo, el contacto con la fuente de calor mantiene su temperatura constante.



Segunda etapa. El cilindro se aísla térmicamente. Al continuar la expansión y perder el contacto con la fuente de calor, el gas se enfría. Su temperatura desciende hasta  $T_2$ .



sar que hemos cumplido nuestro objetivo, al invertir todo el calor recibido en el giro del eje, pero más bien nos encontramos en una encrucijada. La caída de la biela no restituye al émbolo a su posición inicial. Para completar el giro e impulsar una segunda vuelta hay que devolver a la máquina al punto de partida. Esto supone empujar el émbolo hacia la izquierda, venciendo la resistencia del gas, que se intensifica conforme se va comprimiendo. La operación consumiría la misma cantidad de trabajo que acabamos de ganar. Saldría lo comido por lo servido, un balance energético que no despierta el entusiasmo de ningún ingeniero.

Cuando empujamos el émbolo, la energía de movimiento que le comunicamos se transmite a las moléculas que chocan contra él. La temperatura del gas, por tanto, debería subir, pero la vamos a mantener constante, poniendo el cilindro en contacto con materia fría. ¿Por qué? La materia fría roba al gas la ganancia de energía correspondiente a la compresión, lo que socava su resistencia y nos permite ahorrar esfuerzo en nuestra acción sobre el émbolo (figura 4). Ese ahorro vuelve rentable la máquina. Para regresar a la casilla de salida, solo queda aislar de nuevo el cilindro. Una vez retirada la materia fría, la temperatura del gas subirá mientras se siga comprimiendo, hasta recuperar la temperatura y el volumen iniciales (figura 5).

Este ciclo de cuatro pasos se puede repetir una y otra vez, convirtiendo el calor en el giro del eje. Es el prototipo que ideó Carnot. Si se hacen las cuentas de la energía, se comprueba que el trabajo ganado es igual a la diferencia entre el calor que se suministra al gas en el primer paso y el que este cede en el tercero, para mantener su temperatura constante durante la compresión. No hay modo de esquivar esta última pérdida si queremos que la máquina complete un ciclo útil. Ahí reside el talón de Aquiles de cualquier máquina térmica que identificó Carnot.

Repasemos la actividad de nuestro pequeño motor térmico desde el punto de vista de la simetría y el orden. Al principio, el gas encerrado en el cilindro exhibe un profundo desorden y una alta simetría. Como omitimos el efecto de la gravedad —el experimento se podría hacer a bordo de una estación espacial—, todas las direcciones resultan equivalentes para sus partículas.

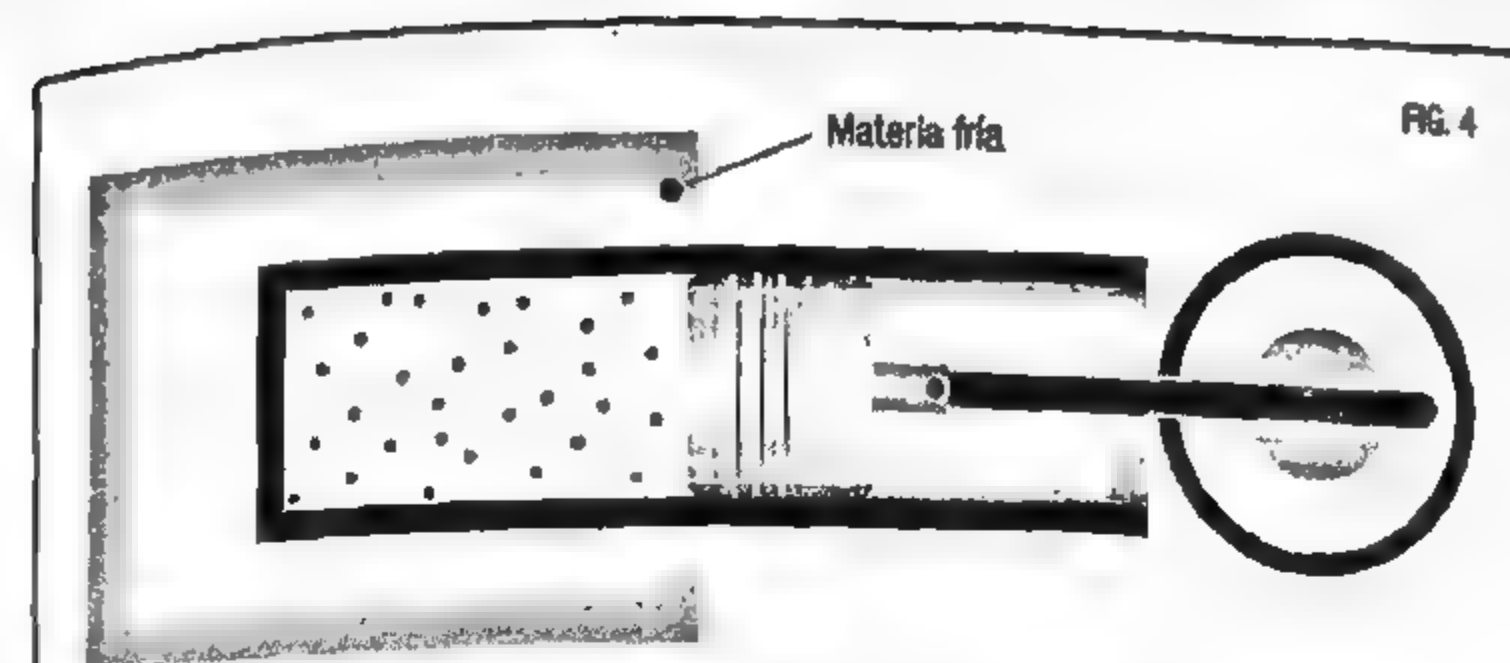


FIG. 4

Tercera etapa. Se realiza trabajo desde el exterior para que el émbolo retroceda y, por tanto, para comprimir el gas. La compresión tiende a aumentar su temperatura, pero el gas se mantiene a  $T_2$  gracias al contacto con una fuente fría, que roba la energía cinética media que debería ganar.

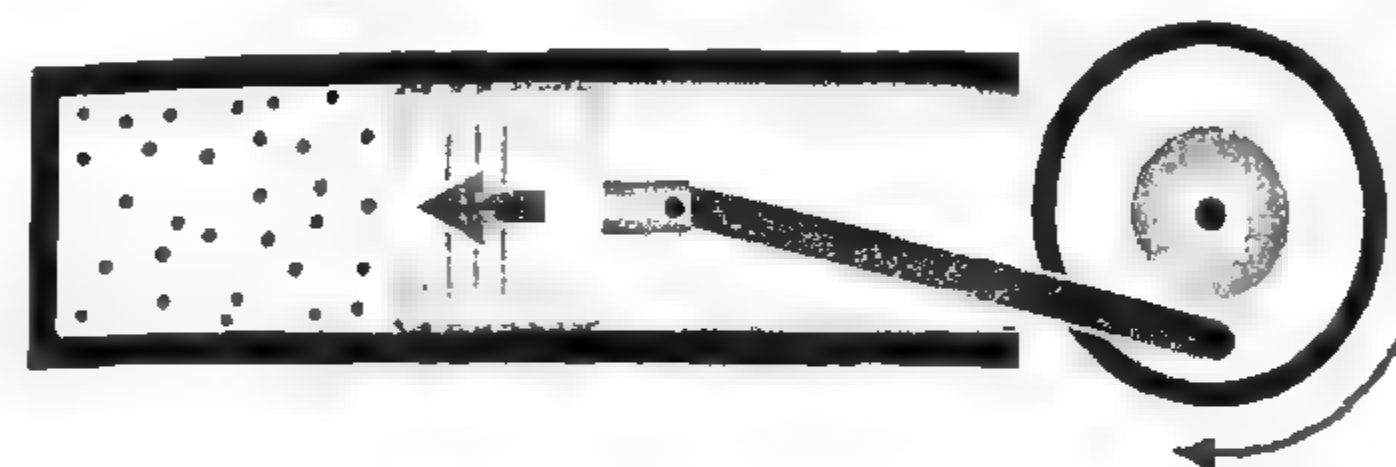


FIG. 5

Cuarta etapa. El cilindro se aísla térmicamente. Al seguir la compresión en ausencia de la fuente fría, sube la temperatura del gas, de vuelta a  $T_1$ . También se recupera el volumen inicial y así se regresa a las condiciones de la primera etapa.

No distinguen arriba de abajo, derecha de izquierda, delante de atrás. Esa indiferencia estorba la producción de trabajo, que busca un desplazamiento específico, ora hacia la derecha, ora hacia la izquierda, para accionar la biela. El émbolo se encarga de romper la simetría, ya que filtra o selecciona aquellas moléculas que viajan hacia la derecha. Su presencia transforma el movimiento caótico, que no favorece orientación alguna, en un desplazamiento organizado. No obstante, la máquina térmica, como los buenos magos, no puede hacer el mismo truco dos veces seguidas. Logra convertir calor en trabajo, pero para sostener su actividad a través de ciclos sucesivos debe pagar un tributo en



forma de calor. La cesión de energía a la fuente fría introduce desorden en el entorno de la máquina. Para mantener constante la temperatura durante parte de la compresión, calentamos las partículas del foco frío, que son las que roban al gas su ganancia de energía cinética. Un incremento de temperatura supone una dinámica molecular más intensa y caótica. El orden que se genera en el movimiento calculado y nada aleatorio de la biela se ve compensado con creces por el desorden introducido en las partículas del foco frío. Aunque parezca que la máquina térmica extrae orden del desorden, en realidad vuelve más desordenado el universo. O dicho de otro modo, consigue generar localmente orden, pero a costa de un aumento neto de desorden en el sistema completo, que contempla no solo al cilindro, la biela y el eje, sino también a los dos focos, caliente y frío.

La moraleja que cierra la fábula de Carnot es que no se puede explotar todo el movimiento molecular para mantener en funcionamiento una máquina. La redistribución de la energía que interesa al ingeniero y que ocurre en la conversión de calor en trabajo exige una criba, discrimina una dirección e impone un sentido. Para aprovechar la energía cinética que almacenan las moléculas de vapor de agua en su ajetreo aleatorio, hay que imponer la asimetría y esta acción acarrea un aumento global de desorden.

## SEGUNDA LEY Y ORDEN

El modelo de Carnot sirve de botón de muestra. Allá donde se fije la atención, el calor y el trabajo ponen en evidencia la misma desigualdad. El trabajo se muestra siempre dispuesto a entregarse por completo al calor. El conductor de un vehículo en marcha puede disipar toda su energía de movimiento al clavar los frenos. Durante la desaceleración, la fricción subirá la temperatura de los neumáticos y el asfalto. La operación inversa nunca tiene lugar. El asfalto caliente no provoca el arranque de ningún coche, aunque la energía se conservaría en el proceso. Los barcos tampoco navegan valiéndose del calor del mar, ni los

aviones despegan robándole energía a las moléculas del aire. En todos estos ejemplos el movimiento térmico caótico de los átomos o las moléculas tendría que plegarse a una dirección particular, aquella en la que deseamos que circule el coche, el barco o el avión. Las hélices de una lancha motora agitan las moléculas del agua, elevando su temperatura. Si se apaga el motor, las moléculas de agua golpean las hélices, pero lo hacen en todos los puntos y desde todas las direcciones, al azar. Sus impactos no se coordinan para hacerlas girar en el mismo sentido vuelta tras vuelta. Es posible ejecutar el truco una vez, marcando el rumbo de las partículas, como hace un cilindro con un émbolo o el cañón de un arma de fuego, pero no cabe repetirlo de manera sostenida. Hay que aceptar que el calor se entrega con renuencia al trabajo. El desorden no se disciplina espontáneamente. Antes bien, parece proclive a aumentar siempre.

Cuando el calor se convierte en trabajo o cuando el trabajo se transforma en calor, la energía se redistribuye entre las moléculas en juego. Aunque la energía total se conserva, el reparto dibuja escenarios muy distintos en cada caso. El precio del movimiento ordenado implícito en la producción de trabajo es un incremento neto de desorden en el entorno. No existe ningún equilibrio, por tanto, entre los procesos de organización y desorganización molecular. El segundo parece ubicuo y natural, mientras que solo a base de ingenio y esfuerzo se logran aumentos parciales de orden. La segunda ley extiende el déficit de la máquina de vapor a todo el universo. En términos más melodramáticos, se puede hablar de degradación de la energía. Los flujos de energía útiles precisan el concurso de ciertas estructuras, como los émbolos y las bielas, cuyos átomos exhiben un grado de organización notable. Si la tendencia dominante es el crecimiento imparable del desorden, llegará el día en el que se volverán inviables y el caos absoluto acabará imperando. El universo contendrá entonces la misma energía, pero ninguna máquina o ser vivo podrá aprovecharla. William Thomson fue el primero en vislumbrar «un estado de reposo y muerte universal». La visión no debió de resultarle muy halagüeña, porque se apresuró a ofrecer una salida: un universo sin frontera, entregado «a un progreso continuo, a través



de un espacio ilimitado». Otros, menos optimistas, se adhirieron a la idea de «la muerte térmica del universo».

Los pioneros de la termodinámica destaparon un sesgo físico radical y profundo en los fenómenos. Un sinfín de posibilidades, aunque permitidas por los principios más generales, sencillamente no se materializan. Una mirada perspicaz advierte aquí el *leitmotiv* de la flecha del tiempo. La conversión total de calor en trabajo —el ordenamiento espontáneo de una asamblea de partículas—, que nunca se observa, supondría una escena rebobinada de fenómenos que sí se contemplan en la naturaleza. Al invertir la película del frenazo, veríamos cómo un asfalto caliente comunica su energía a las ruedas forzando al vehículo a dar marcha atrás. Tal sucesión de acontecimientos no viola la conservación de la energía ni la causalidad. Establece una cadena de causas y efectos válida, de acuerdo con las leyes fundamentales de la física. Las reversiones también eliminarían las trabas de la máquina de Carnot. Una vez completado el segundo paso, las moléculas podrían concentrarse de modo fortuito en la esquina izquierda del cilindro, sin chocar en absoluto contra el émbolo en su camino de vuelta. Al no oponer resistencia alguna, este regresaría a la primera etapa sin necesidad de un foco frío.

La segunda ley descubre en la naturaleza una señal de sentido único, cuya flecha bien podría ser la del tiempo. Sin embargo, tampoco explica su razón de ser. El valor de la ley reside en que parece cumplirse sin excepción, circunstancia que no debe confundirse con una prueba. ¿Quién nos dice que no se infrinja en infinidad de situaciones que desconocemos? Lo mismo puede decirse de las hipotéticas reversiones que consideramos en el primer capítulo. Quizá ciertas estructuras complejas, como los virus, se forman espontáneamente o, una vez rotas, se recomponen por intervención del azar, aunque nunca hayamos tenido ocasión de verificarlo. La segunda ley ayuda a redefinir el problema, pero, por el momento, no lo resuelve.

En el empeño por demostrar la segunda ley, la termodinámica llegó a su madurez. Antes tuvo que trascender la perspectiva macroscópica e internarse en un ámbito no solo inexplorado,

sino literalmente inexplorable, fuera del alcance de los sentidos y de cualquier instrumento de observación concebido por el hombre: la escala atómica y molecular. Llama la atención que la termodinámica lograra resultados tan sólidos y generales ignorando por completo la composición de los gases, sólidos y líquidos cuya evolución estudiaba y de cuya estructura interna se tenía una imagen, siendo generosos, difusa. Su éxito hizo que muchos científicos se convencieran de que había que atenerse a ese programa y evitar cualquier tentación metafísica, en particular, cualquier hipótesis inverificable, como postular que la materia se componía de partículas. Ya en 1738 Daniel Bernoulli había propuesto modelos moleculares para explicar la ley de Boyle, por ejemplo, pero su trabajo encontró escasa repercusión. Peor suerte corrió en 1845 John James Waterston, cuando presentó ante la Royal Society de Londres una demostración de que la presión de un gas podía explicarse como el resultado del impacto de millones de moléculas contra las paredes del recipiente que lo contiene. El vicepresidente de la honorable institución, tras leer el artículo, lo declaró «sin sentido, inservible siquiera para ser leído ante la sociedad». Fue Clausius quien pocos años después consiguió por fin consolidar esta línea de investigación. Lo hizo con dosis iguales de rigor matemático y cautela, practicando una cirugía preventiva, que separó sus investigaciones basadas en la hipótesis atómica de aquellas en las que prescindía de ella.

El principal inconveniente de intentar ligar las variables fundamentales, microscópicas, como la velocidad y la posición de cada molécula, con las variables macroscópicas, como la presión y la temperatura, es que obliga al científico a internarse en un territorio inaccesible a la experimentación directa. Resulta imposible miniaturizarse y estudiar qué hacen las moléculas cuando el calor se transforma en trabajo, por ejemplo. Lo único que registraban los aparatos de la época, al igual que los sentidos humanos, eran promedios. No había modo de verificar la hipótesis de Bernoulli o de Waterston sorprendiendo, en efecto, a un batallón de moléculas en el momento de rebotar contra un émbolo. Había que tender, por tanto, un puente entre la escala



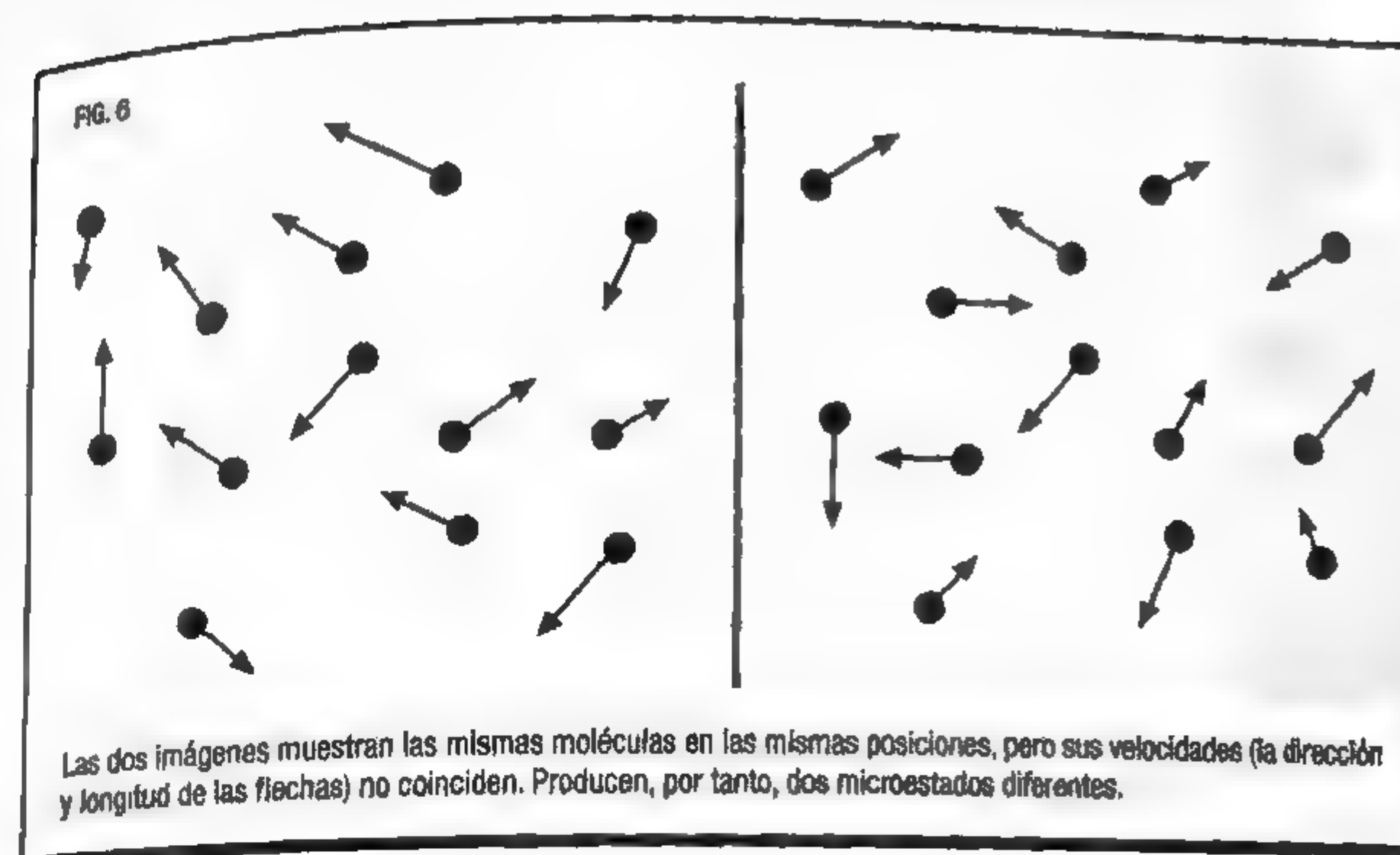
en la que se desenvuelven con naturalidad las partículas que consideremos elementales, ya sean átomos o moléculas, y los sistemas complejos que suponemos que componen. Los arquitectos de ese puente engrosaban las filas de una segunda generación de físicos termodinámicos, encabezados por James Clerk Maxwell, Josiah Willard Gibbs y Ludwig Boltzmann.

Postularon un determinado modelo microscópico, regido por leyes newtonianas, y aplicaron el cálculo de probabilidades para inferir su comportamiento colectivo. Si este coincidía con los promedios observados, con los cambios de temperatura, volumen y presión que registraban los aparatos, con la viscosidad o la conductividad térmica que se medía en el laboratorio, la hipótesis molecular adquiriría una razonable verosimilitud. Así y todo, el procedimiento exigía una confianza ciega en los poderes de la extrapolación y de la lógica matemática y no todos los científicos estuvieron dispuestos a dar el salto. Muchos, como el influyente Ernst Mach o Max Planck, pusieron en solfa la mera existencia de los átomos porque no se podían ver.

Fue Boltzmann quien pugnó con más ahínco por demostrar la segunda ley, tratando de relacionar mediante argumentos estadísticos un escenario molecular regido por las leyes de la mecánica newtoniana, simétricas, con la asimetría macroscópica que habían puesto de manifiesto Clausius o Thomson. Afrontó el desafío en el campo de honor clásico de la termodinámica: un gas diluido encerrado en un recipiente. Supuso que las moléculas interactuaban entre sí y con las paredes débilmente, mediante colisiones.

### EL IMPERIO DEL AZAR

Boltzmann perfiló con nitidez las dos perspectivas, microscópica y macroscópica, antes de relacionarlas matemáticamente. Una fotografía de grupo de todas las moléculas del gas, sorprendidas cada una en un punto del espacio, dentro del recipiente, define un «microestado». La instantánea recoge no solo las posiciones, también las velocidades (figura 6). Como cada molécula



Las dos imágenes muestran las mismas moléculas en las mismas posiciones, pero sus velocidades (la dirección y longitud de las flechas) no coinciden. Producen, por tanto, dos microestados diferentes.

la se halla en un estado de constante movimiento, a medida que pasa el tiempo las fotografías se suceden, retratando diferentes configuraciones. Sin embargo, los sentidos humanos son incapaces de distinguir entre sí la mayoría de estas instantáneas. Cuando una persona se instala cómodamente en una habitación cerrada, las moléculas del aire se entregan a un ajetreo continuo a su alrededor. Atraviesan el espacio a una velocidad de casi dos mil kilómetros por hora, rebotan contra su cabeza, las paredes o el techo. Pasan las horas y el individuo no advierte el menor cambio en el ambiente del cuarto. Tampoco lo hará ningún instrumento de medida que, como nuestros sentidos, registre promedios, como un barómetro o un termómetro convencional. La imagen que dibujan la presión, el volumen o la temperatura constituye un «macroestado». Una criatura ultra-perceptiva que se sentara en la misma habitación y que fuera capaz de determinar la posición y la velocidad de cada una de las  $10^{27}$  partículas vería que, a cada instante, el estado del aire está cambiando. A medida que transcurren los segundos, las fotografías macroscópicas del gas permanecen inmutables. Las fotografías microscópicas se renuevan sin descanso. Esas son



las dos perspectivas que debe conectar la estadística: la humana, que percibe macroestados, y la de la criatura ultraperceptiva, que considera microestados. La primera lleva la marca de la flecha del tiempo o de la flecha termodinámica de la segunda ley. La segunda se rige por leyes simétricas.

Por supuesto, se producen alteraciones en el gas que los sentidos humanos sí perciben. Los macroestados también evolucionan. Tras el ocaso, el Sol deja de calentar la atmósfera y desciende la temperatura del aire en el exterior. La velocidad media de sus moléculas disminuye y chocan contra la pared o la ventana de la habitación con menos fuerza. Los átomos que integran el sólido muro, que aún no se ha enfriado, responden con el mismo ímpetu de antes. Este desequilibrio provoca una progresiva redistribución del remanente de energía que atesoran. Su temperatura baja poco a poco durante el proceso. Ahora, quienes cuentan con una energía cinética media superior son las moléculas del aire atrapado dentro de la habitación, pero sus choques contra la pared que se enfría no tardan en ocasionar una nueva redistribución energética, a medida que se ralentizan al chocar contra partículas más lentas. El calor fluye así del muro al exterior y del interior del cuarto al muro. La persona termina por notar un descenso de la temperatura. De nuevo, habría numerosísimos microestados compatibles con la nueva velocidad media de las moléculas del aire, más baja. La criatura ultraperceptiva, que vigila la historia individual de cada partícula con precisión absoluta, no ha dejado de apreciar una instantánea distinta detrás de otra. Los seres humanos solo se percatan de las alteraciones colectivas. Si, para combatir el frío, la persona enciende una estufa, la resistencia del aparato, al calentarse, animará la agitación de las moléculas de aire de la habitación y se sucederán nuevos macroestados.

En resumen, los diferentes microestados se pueden agrupar dentro de categorías, en función de atributos perceptibles a escala humana, como la temperatura, el volumen y la presión. Infinidad de instantáneas de las moléculas de aire corresponden, por ejemplo, a unas condiciones de 26 °C y una atmósfera de presión, en un espacio cerrado de veinte metros cuadrados de superficie

y tres metros de altura. Todos los microestados compatibles con un macroestado concreto se consideran equivalentes. Todas las fotografías que distingue la criatura ultraperceptiva y que el observador humano considera iguales componen el macroestado. La clasificación de microestados en macroestados obedece, claro está, a un criterio subjetivo. La termodinámica es el estudio de los fenómenos tal como se manifiestan a una escala peculiar, arbitraria en cierto sentido, y delata el tamaño de los observadores humanos. El fuero natural de las partículas elementales (si no las consideramos una mera abstracción humana, igual de prejuiciosa) viene delimitado por las leyes fundamentales. La perspectiva que adopta la termodinámica la determinan los promedios que llevan a cabo nuestros sentidos, que entienden de temperatura, presión o volumen, pero no de velocidades individuales de las partículas.

La magnitud que mide la cantidad de microestados compatibles con cada macroestado se llama «entropía». Refleja el número de cambios que puedes introducir en un sistema a nivel microscópico, como modificar la posición o la velocidad de ciertas moléculas, sin que te des cuenta macroscópicamente. Con más propiedad, la entropía de un macroestado es proporcional (se multiplica el valor por una constante) al logaritmo de su número de microestados. *Grosso modo*, el logaritmo de un número cuenta su número de dígitos. Así, el logaritmo de 86 es, aproximadamente, 2 y el de 68957, 5. Los logaritmos ayudan a manejar números con muchas cifras, como los que surgen en el recuento de estados de un sistema macroscópico. También permiten expresar la entropía de un sistema compuesto por dos subsistemas independientes como la suma de cada una de sus entropías. Si representamos la entropía con la letra  $S$  y el número de microestados para una energía dada con una  $W$ , estamos en condiciones de escribir una de las ecuaciones más célebres en la historia de la física:  $S = k \cdot \log W$ , donde  $k$  es una constante y la abreviatura  $\log$  representa la palabra «logaritmo». Así figura en el monumento de Boltzmann, en el cementerio Central de Viena, bajo la ceñuda e imponente efigie de mármol del físico austriaco. Según parece, Boltzmann nunca llegó a escribirla en esos términos, ya que prescindió de la constante. Curiosamente,



esta lleva su nombre y fue introducida por uno de sus rivales científicos, Max Planck.

La entropía ya había hecho acto de presencia en la termodinámica antes de que Boltzmann la interpretara estadísticamente. Su padrino había sido Rudolf Clausius, quien, en 1865, le había asignado el papel de árbitro capaz de decidir qué fenómenos se podían dar o no en la naturaleza dentro del marco de la primera ley de la conservación de la energía. Definió la entropía solo con variables macroscópicas, como la cantidad de calor recibido o cedido por un sistema dividida por su temperatura. Comprobó que en multitud de fenómenos que no se observan en la naturaleza y que implican un incremento de orden molecular, como un vehículo puesto en marcha con el calor del asfalto, un barco que navegue gracias al calor del mar o un cubito de hielo que se forme gradualmente en un vaso de agua tibia, la entropía disminuye. Clausius pudo reformular así la segunda ley en términos de la nueva variable que había forjado: «la entropía del universo tiende a un máximo». Sin necesidad de abarcar todo el universo, la entropía de un sistema aislado, o bien permanece constante, o bien aumenta, pero nunca disminuye. De hecho, un estado de equilibrio puede definirse como aquel en el que el sistema ha coronado su máxima entropía. ¿Por qué el cociente entre el calor y la temperatura ofrecía un juicio tan certero sobre la viabilidad de los fenómenos? Boltzmann disipó las tinieblas del misterio aplicándole la luz de la estadística.

La vida nos enseña que el orden es un concepto bastante relativo. En cualquier caso, parece obvio que, ante un sistema formado por numerosos elementos, existen más modos de disponerlos de acuerdo a un patrón determinado que al azar. El orden corresponde invariablemente a configuraciones privilegiadas, sea cual sea el criterio que escojamos para definir las. La analogía de una película nos permite verlo con claridad. Un largometraje estándar, que dure hora y media, se compone de unos 129 600 fotogramas. El director arma con ellos una secuencia muy particular: la película que sale de la sala de montaje. Barajadas de forma aleatoria, esas ciento treinta mil imágenes podrían originar un número exorbitado de películas (la cifra supera un uno segul-

do de medio millón de ceros:  $10^{60311}$ ). La inmensa mayoría no tendría ningún sentido. Cada serie posible de ciento treinta mil fotogramas constituye un microestado. La definición de los macroestados admite una cierta flexibilidad, ya que, como siempre, se supedita a un punto de vista. Un único microestado merece la etiqueta de «película completa con sentido». Su entropía es mínima y su orden, máximo. Por otro lado, encontramos una cantidad aplastante de microestados que calificaríamos de «película sin ningún sentido». A medio camino entre ambos extremos, se sitúan películas que contienen fragmentos con sentido de extensión variable. Cabe concluir que cuanto más sentido exhiba la sucesión de fotogramas, menos margen dejaremos al azar, lo que se traduce en que habrá menos microestados compatibles. A más sentido (más orden), menos entropía.

En el próximo capítulo veremos que el concepto de orden tampoco se puede identificar a ciegas con poca entropía. Se producen excepciones notables cuando la gravedad adquiere un papel relevante, salvedad que no viene al caso en nuestra presente discusión. La correspondencia entre orden y baja entropía se puede asumir para el sistema formado por el gas encerrado en un recipiente que consideraba Boltzmann. Existe un número extraordinario de microestados que asociaríamos al macroestado de equilibrio del gas a una temperatura dada. Exhiben el máximo desorden posible con la energía a su disposición y en ellos no se aprecia orden alguno, ya que las moléculas se distribuyen a lo ancho y largo del recipiente recorriéndolo en todas las direcciones y sentidos. Hay muchísimos menos microestados donde, con la misma energía, se disponen de manera organizada. Esto ocurriría si, por ejemplo, evitaran sistemáticamente determinados volúmenes del recipiente. De darse la circunstancia, la persona de la habitación se podría asfixiar después de que, por puro azar, ninguna molécula de aire pasara cerca de su nariz o de su boca durante varios minutos. Hasta donde sabemos, tal contingencia nunca se ha producido. No es de extrañar. El cálculo de probabilidades indica que habría que esperar, de media, un periodo de tiempo más largo que la edad del universo para asistir a un accidente semejante.



La asociación entre el orden que se aprecia en una configuración y su entropía ofrece una atractiva explicación de la segunda ley de la termodinámica, tal como la había reformulado Clausius. Que en los fenómenos de la naturaleza la entropía siempre aumente conlleva que sucede lo mismo con el desorden. Esta es una consideración intuitiva que ya habíamos manejado en el caso particular de las conversiones entre trabajo y calor, para explicar su asimetría mediante imágenes microscópicas. Cuando el trabajo se disipa en calor, el movimiento ordenado se desbarata, la entropía crece. Para extraer trabajo del calor, hay que poner orden en el caos. El único modo de hacerlo consiste en bajar la entropía localmente, a costa de incrementarla en el entorno. Ese malabarismo es el que ejecuta la máquina de Carnot. La primacía del desorden no afecta solo a las máquinas térmicas o a cualquier clase de máquina que pueda imaginarse, sino también a cualquier fragmento de materia macroscópica que exhiba estructura, desde una roca a un leopardo o una estrella. Todos ellos surgieron en procesos en los que creció el cómputo de la entropía global, aunque descendiera en la organización de las partículas que los componen.

La entropía también sirve como índice para marcar el grado de utilidad de la energía. Si un sistema se halla en desequilibrio y exhibe poca entropía, entonces alberga grandes reservas de energía aprovechable. Cuando alcanza su máxima entropía, la energía se habrá degradado por completo y no servirá para producir trabajo, a menos que intervengamos desde fuera, como sucedía en la tercera etapa del ciclo de Carnot. En el momento en el que se amplía la perspectiva para incluir, no solo al sistema que se organiza, sino también al agente externo que introduce el orden, se comprueba que la suma de entropías vuelve a aumentar.

La segunda ley de Clausius era fruto de una observación empírica. Una vez que hubo definido la entropía, comprobó que esta crece sin excepción en los procesos que se observan en la naturaleza. La reinterpretación estadística que acabamos de plantear ofrece una explicación plausible de por qué es así. Sin embargo, Boltzmann demandaba algo más concluyente: una demostración. Uno puede aceptar que existen más configuracio-

nes desordenadas que ordenadas, pero ¿basta este desequilibrio para inclinar la balanza invariablemente a favor de las primeras? ¿Cómo se transita de unas a otras? ¿Por qué cualquier sistema formado por una cantidad ingente de elementos se ve abocado sin remisión hacia las configuraciones más desordenadas? En función de las circunstancias, un estado singular puede ganar siempre. Un hoyo presenta muchos puntos en su superficie. Uno solo ocupa la posición más baja. Cuando se deja rodar una canica desde cualquier altura, siempre acaba en el punto más bajo. No en todos los casos la fuerza del número vence a los estados excepcionales. De ahí que Boltzmann tuviese que modelizar con rigor matemático el proceso inexorable de incremento de desorden en un gas constituido por cuatrillones de moléculas.

De entrada, asignó a todos los microestados compatibles con una energía dada la misma probabilidad. De este modo, los macroestados con más microestados parten con ventaja. Podría plantearse una analogía con los juegos de azar. Todos los números que participan en un sorteo de la lotería tienen la misma probabilidad de salir premiados. No obstante, las personas que compran más billetes contarán con mayores probabilidades de ganar. Basándonos en el criterio del orden, ¿cuáles son los macroestados más probables? En general, el repertorio de configuraciones desordenadas es muchísimo más amplio que el de las ordenadas. La desigualdad se acentúa cuantos más elementos incorporemos al sistema. Es fácil comprobarlo en el ejemplo de la película. Si el montador recibiera del director solo dos fotogramas, podría ensamblar con ellos una película ordenada y otra desordenada. En la versión ordenada, el segundo fotograma sigue al primero. En la desordenada, se invierten las posiciones. Con tres fotogramas, podría montar una película ordenada y cinco desordenadas. Con diez fotogramas, crece la diferencia: hay una ordenada y más de tres millones y medio de desordenadas. La brecha de probabilidad se vuelve brutal en los sistemas materiales macroscópicos. En el recipiente de Boltzmann o en una habitación se cuentan más de  $10^{24}$  moléculas de aire. Los dígitos del número de sus posibles configuraciones desordenadas desbordaría la cantidad de caracteres que se pueden imprimir en esta página.



La enorme discrepancia entre el número de configuraciones ordenadas y desordenadas parece cargar decisivamente el dado en favor de estas últimas. El gas dispone de una energía, que puede distribuir entre sus moléculas de acuerdo con infinidad de repartos diferentes. Si las partículas no interactuasen y tampoco chocasen contra las paredes, se atravesarían como espectros y cada una mantendría siempre la misma energía. No se advertiría ninguna mudanza macroscópica. Boltzmann postuló que los repartos de energía varían en virtud de las colisiones. Estas modifican la velocidad individual de las partículas y, por tanto, su energía cinética. Merced a los impactos, transcurrido un tiempo, un número promedio de moléculas cambia de estado. Boltzmann supuso que la nueva cantidad de energía que se adjudica a cada partícula que ha chocado obedece al azar, dentro de los límites de la conservación de la energía total. En la analogía de la película, las colisiones se podrían representar mediante cambios en el orden de los fotogramas. La evolución del montaje tendría lugar, por ejemplo, intercambiando cada segundo las posiciones de veinte fotogramas escogidos al azar. Si el proceso se iniciara en el macroestado de «película con sentido» su curso más probable contemplaría una sucesión de macroestados cada vez más desordenados, es decir, con menos sentido, hasta alcanzar un equilibrio donde el barajado de fotogramas conduciría de una película sin sentido a otra película sin sentido. Este progresivo deterioro de la inteligibilidad de la película corresponde al crecimiento de la entropía, hasta que se alcanza el máximo.

Cuando el azar se convierte en el crupier que baraja los repartos de energía entre las moléculas que chocan y la probabilidad de un macroestado depende exclusivamente de la cantidad de microestados, los macroestados con más microestados, que son los más desordenados, acumulan (casi) todas las papeletas para ganar. Se puede leer el proceso como un viaje desde una configuración arbitraria hasta el macroestado más multitudinario.

En el caso del gas, la demostración matemática de la segunda ley impuso a Boltzmann una hipótesis adicional, de apariencia inocente. Acabaría siendo el boquete por el que haría agua toda su argumentación. Solo consideró colisiones entre dos moléculas

y supuso que estas, antes de chocar, no se hallaban correlacionadas. Vale decir que sus posiciones y velocidades eran del todo independientes. Una partícula salía al encuentro de la otra sin ninguna conciencia de un pasado común. Con estas premisas, Boltzmann planteó las ecuaciones y comprobó que su modelo de gas estadístico evolucionaba, desde cualquier situación de partida que escogiera, y por medio de las colisiones, hasta un estado de máxima entropía, que correspondía al equilibrio. Ya no se trataba de una observación empírica, la segunda ley de la termodinámica se había establecido como una consecuencia inevitable de la hipótesis atómica.

## LA SEGUNDA LEY Y LA FLECHA DEL TIEMPO

La interpretación estadística del segundo principio de la termodinámica arroja una lectura reveladora de la flecha del tiempo. A los ojos de Boltzmann, el tiempo recibe con todo merecimiento el calificativo de «gran destructor». Aniquila ciudades, imperios y continentes. Incluso planetas y estrellas. En verdad, arruina cualquier muestra de organización, ya que corre siempre a favor de los macroestados con más microestados. Ese es el sentido que señala la punta de la flecha. Su meta última, como la de la diosa Eris, es el caos. El agua líquida admite más desorden que el agua en estado sólido. Cuando un cubito de hielo se derrite, sus moléculas abandonan poco a poco una configuración muy organizada: una estructura cristalina donde distancias y ángulos precisos las separan. Resulta más probable que alguna molécula abandone esta rígida formación que no que todas permanezcan en su sitio. Una vez libre, parece más probable que se pierda y deambule por el fluido que no que regrese a ocupar una posición fija de la red. ¿Por qué el hielo se funde pero no se forma espontáneamente? Porque existen muchos más microestados en los que las moléculas disfrutan de la relativa autonomía del líquido que aquellos en los que un puñado se asocia para componer un microcristal de hielo. Y existen más microestados en los que ese microcristal se deshace a continuación que microestados donde el orden sigue



creciendo gracias a la incorporación de nuevas moléculas a la red. Y así sucesivamente. La estructura del hielo es mucho más frágil que la del agua líquida. Aguanta peor las acometidas del azar, enseguida se desmantela, mientras que el líquido mantiene su entidad bajo infinidad de barajados moleculares. El sentido que marca la flecha del tiempo es aquel en el que aumenta el desorden y los átomos y las moléculas derivan hacia configuraciones más probables, huyendo de la excepcional anomalía del orden. Las estructuras organizadas se van deshaciendo de manera progresiva, como el hielo en el agua.

Si se cambia el signo del tiempo en las ecuaciones fundamentales que describen la trayectoria de las partículas que participan en la fusión del hielo, la entropía disminuye. Se llega a la misma conclusión al analizar cualquier fenómeno natural. La entropía sirve, por tanto, para señalar en qué sentido corre el tiempo. Si disminuye, estás viajando hacia el pasado (contemplas una película que se rebobina); si aumenta, te diriges al futuro. La asimetría entre pasado y futuro se debe a que el mundo material detenta un orden insostenible, que se va desmoronando, diluyéndose en el caos donde las partículas multiplican sus alternativas. No se observan secuencias rebobinadas porque la posibilidad de que una estructura compleja se consolide en virtud de incontables procesos fortuitos resulta extremadamente remota. Fluimos sin remisión, pero no del pasado al futuro, sino del orden al desorden, de microestados excepcionales a otros más corrientes. El futuro es la ruta que conduce hasta la máxima entropía. Recordemos que la generación de orden que supone, por ejemplo, el desarrollo de seres vivos constituye un espejismo, como el metódico vaivén de la biela que alienta la máquina de vapor. Se trata de fenómenos locales que se encuadran en procesos más amplios, donde las cuentas globales arrojan siempre un incremento de desorden.

¿La demostración de Boltzmann resuelve así la paradoja de la flecha del tiempo? El propio Boltzmann pensó que había probado la segunda ley de la termodinámica, al menos para el caso del gas encerrado dentro de un recipiente. La extensión de sus argumentos a sistemas más complejos no parecía plantear en principio complicaciones insuperables.

De estar en lo cierto, había dado el espaldarazo definitivo a una de las premisas de la demostración, la hipótesis atómica. En consecuencia, sus detractores acérrimos le saltaron al cuello. Particularmente críticos fueron los físicos de la Universidad de Berlín, Max Planck, Wilhelm Ostwald, Ernst Mach y Ernst Zermelo. La prueba de Boltzmann también suscitó dudas en otros científicos que no cuestionaban la existencia de los átomos o de las moléculas. El punto central de sus objeciones se planteó con el formato de una contradicción, la «paradoja de Loschmidt», que recibe su nombre del checo Johann Josef Loschmidt, antiguo compañero de universidad de Boltzmann. La idea no era del todo original, puesto que Maxwell y Thomson ya la habían discutido casi en los mismos términos. Loschmidt sentía poco aprecio hacia la segunda ley de la termodinámica, que parecía condenar al universo a una muerte térmica. Repasó minuciosamente la exposición de Boltzmann y no tardaron en despertarse las sospechas: ¿cómo podía una demostración basada en ecuaciones simétricas, newtonianas, deducir la asimetría de la segunda ley?

A escala microscópica, las moléculas tenían que dibujar un conjunto de trayectorias bien definidas, aunque nadie acertara a registrarlas, que se entrecruzarían en colisiones predeterminadas. Así, cada microestado procedía, mediante una conexión causal, de otro anterior. El elemento azaroso surgía a cuenta de nuestro conocimiento limitado del sistema. En realidad, ningún procedimiento aleatorio baraja los repartos de energía entre las partículas que chocan. Loschmidt señaló que cualquier historia colectiva del gas donde el desorden se incrementara de modo progresivo contaba con una versión rebobinada. Bastaba con tomar la última fotografía microscópica e invertir todas las velocidades de las partículas. En la evolución revertida que tendría lugar, la entropía disminuiría de forma sostenida en vez de aumentar y se violaría la segunda ley de la termodinámica. ¿Por qué poner el énfasis en un conjunto de historias y no en sus in-

Me propongo destruir la aureola terrorista de la segunda ley, que ha hecho que parezca un principio aniquilador para todos los seres vivos del universo.

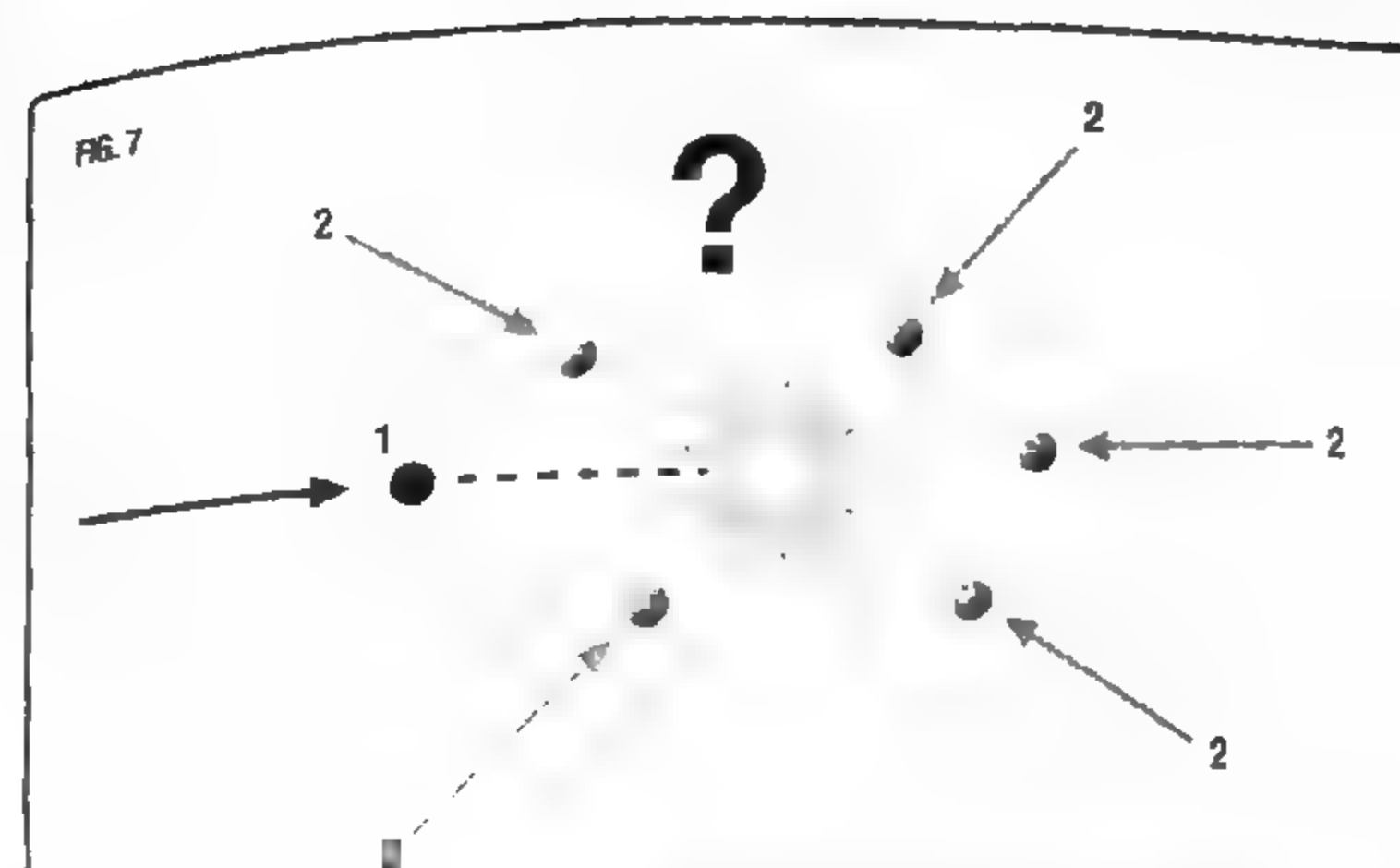
JOHANN JOSEF LOSCHMIDT



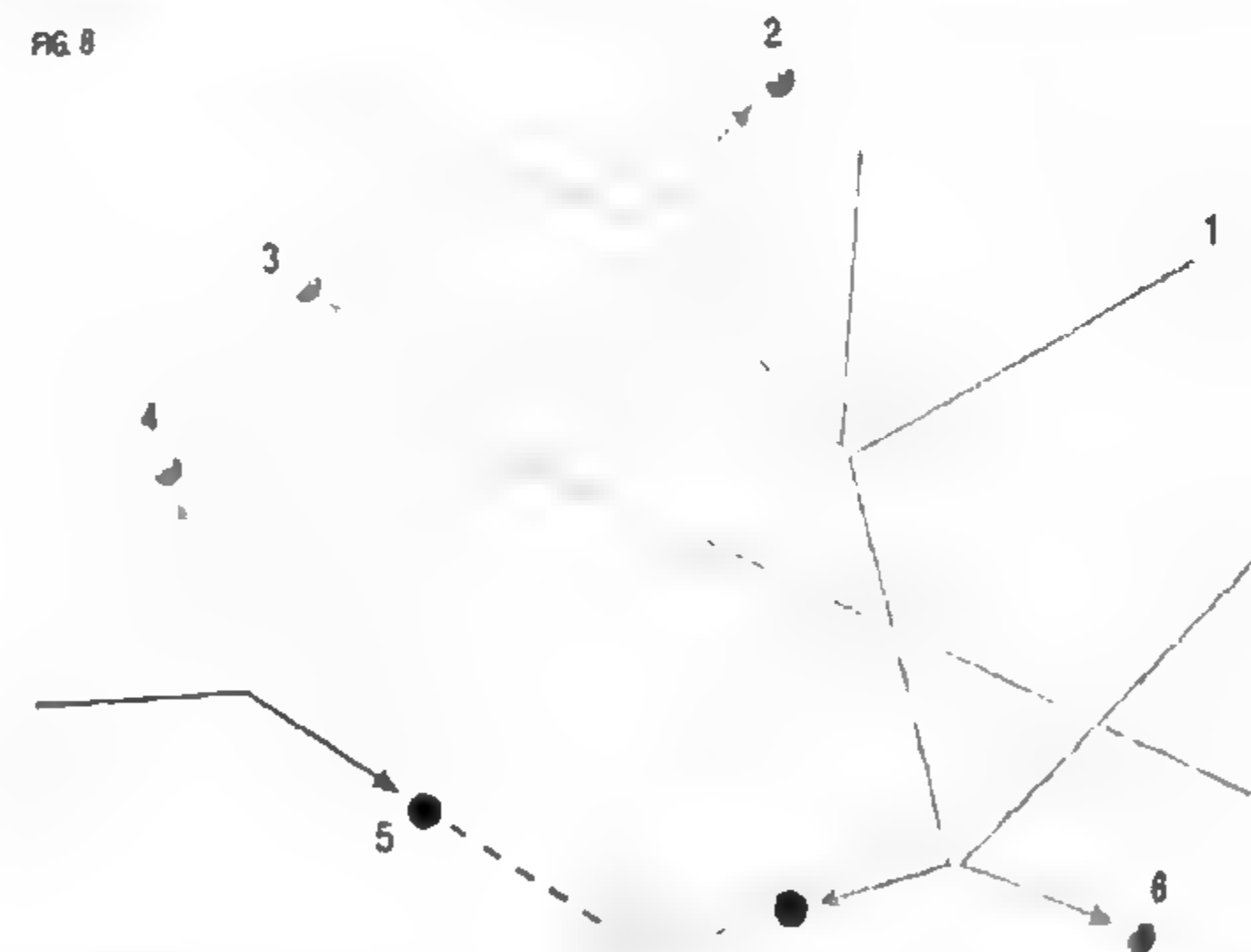
versas? Un criterio puramente aleatorio no debía favorecer ninguna de ellas. El escenario microscópico que había dispuesto Boltzmann parecía ratificar tanto como impugnar la segunda ley, dependiendo de qué clase de historias escogiera uno.

¿Dónde daba un paso en falso la demostración? ¿Por qué discriminaba los rebobinados? Boltzmann había supuesto que, cuando dos partículas se dirigen hacia una colisión, sus velocidades y sus posiciones son absolutamente independientes. Aun admitiendo este punto, dejan de serlo después del impacto, puesto que las velocidades finales dependen de las iniciales. Con arreglo a la velocidad que traiga la partícula 1, la 2 saldrá despedida en una u otra dirección, con mayor o menor rapidez (figura 7). Y viceversa. El choque condiciona sus trayectorias futuras y, así, funda un pasado común.

A medida que transcurre el tiempo, la posición y la velocidad de cada molécula van acumulando las marcas de todos sus encuentros previos. Si hubieran chocado con otras partículas no estarían donde están ni llevarían la velocidad que llevan. Cada partícula contra la que rebotan carga con su propio pasado, condicionado por choques con otras moléculas, que a su vez se vieron desviadas por otras. Así, el destino de cada una se va ligando al de las demás, armando una historia colectiva bien definida que se puede revertir en cualquier instante (figura 8). En el momento en el que dos moléculas de aire chocan, no podemos dar por sentado que sus velocidades y posiciones sean independientes, ni tratarlas como dos perfectas desconocidas que se acaban de meter en el recipiente, ajenas por completo a lo que sucedió allí con anterioridad. Al imponer la aleatoriedad en sus cálculos, Boltzmann borraba la memoria dinámica de las partículas. Una sucesión inconexa de colisiones fortuitas no se puede rebobinar. La operación de reseteo, injustificable desde la óptica microscópica, es la que introduce a mano la asimetría e imposibilita las historias rebobinadas de Loschmidt. La manipulación se efectúa en el mismo procedimiento que redistribuye la energía entre las partículas, es decir, en el mecanismo que hace evolucionar el sistema. La paradoja de Loschmidt ilustra que no se puede deducir la segunda ley solo a base de inyec-



La trayectoria de la partícula 1 tras el choque queda por completo condicionada por la situación y la velocidad de la partícula 2.



La colisión entre las moléculas 5 y 1 depende de la historia colectiva del gas. Han llegado a esa región del recipiente, con esas velocidades, gracias a su interacción con las demás. En este sencillo ejemplo, la trayectoria de la partícula 3 forma parte del pasado de ambas, luego no son completamente independientes.



tar estadística en una gran asamblea de partículas regidas por leyes newtonianas. Hay que incorporar la asimetría mediante supuestos adicionales.

Boltzmann encajó la crítica de Loschmidt, pero rebajó su alcance. Aceptó que la segunda ley de la termodinámica no fuese un precepto de obligado cumplimiento, como había supuesto Clausius, sino más bien la constatación de una tendencia probabilística. Una tendencia aplastante, eso sí. Un sistema que muestre sus  $10^{24}$  elementos en una configuración ordenada se halla en un estado muy poco probable, por demás inestable. Es más fácil que derive hacia estados más desordenados, muchísimo más abundantes, que no que mantenga el orden (pase a otros microestados igual de raros) o que lo aumente (pase a microestados más improbables todavía). De manera esporádica, cabe contemplar aumentos de orden, cierto, que podemos denominar «fluctuaciones», pero estadísticamente resultan irrelevantes. Al final, el desorden funciona como una apisonadora que se lo lleva todo por delante. La interpretación estadística suaviza el dictamen de la segunda ley. Afirma que en la mayoría de las ocasiones la entropía aumenta, pero no siempre. Es posible que disminuya de vez en cuando. Boltzmann admitió la ocurrencia de rebobinados ocasionales, pero también subrayó su extraordinaria infrecuencia y, sobre todo, su escaso impacto en la evolución de los sistemas macroscópicos, donde no cobran relieve suficiente para ser observados. En cuanto se alcanza una situación de elevada entropía, resulta extremadamente improbable abandonarla de manera sostenida, yendo de estado afortunado en estado afortunado hasta fabricar un cubo de hielo por puro azar o congregar todas las moléculas de un gas en la esquina de una habitación. Habría que esperar un tiempo casi infinito a que del equilibrio que supone la serie de tres mil fotogramas sin sentido surja por casualidad la película entera tal como la concibió el director. Las historias inversas que Loschmidt sacaba a la luz eran tan probables como lanzar los dados y obtener un doble seis día tras día, semana tras semana.

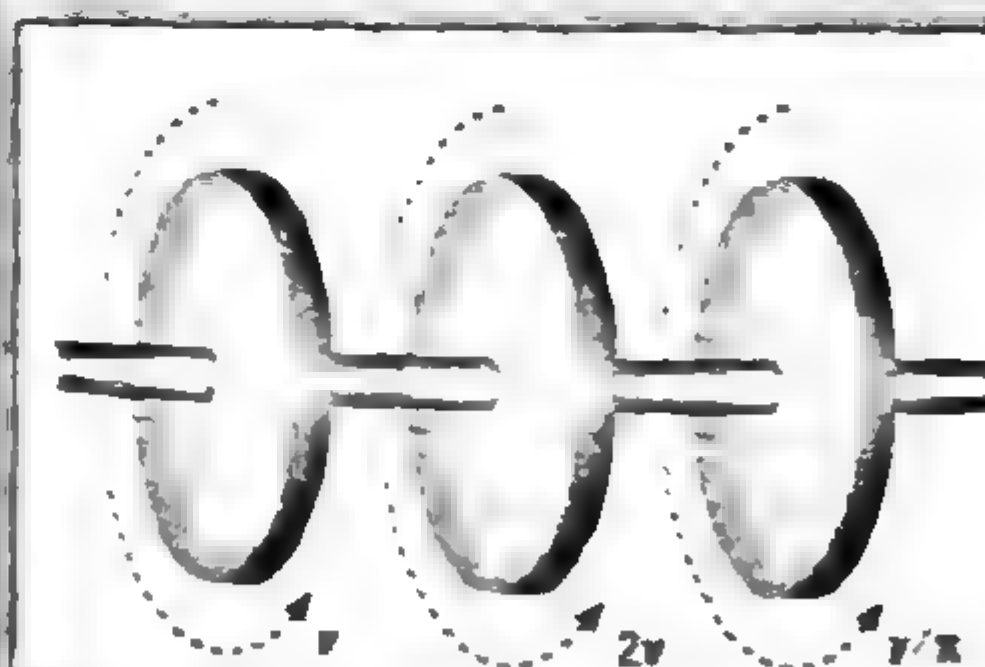
Nadie cuestiona que las configuraciones ordenadas también participen en el juego de azar, pero su número es tan escaso que

## ETERNO RETORNO

La demostración de Boltzmann recibió la embestida de una segunda paradoja, casi tan terrible como la de Loschmidt: la «paradoja de la recurrencia». En esencia, plantea que si el universo se compone de una cantidad finita de piezas (partículas), estas se podrán disponer en un número descomunal —pero, a fin de cuentas, también finito— de configuraciones. En un tiempo ilimitado se agotarán y, por fuerza, habrá de repetirse alguna de ellas. A partir de ese momento, las repeticiones se sucederán recorriendo todos los estados posibles en el mismo orden. Completado el segundo ciclo, le seguirá un tercero, y así sucesivamente. El eterno retorno hace que el universo en equilibrio de Boltzmann deje de ser el fin del recorrido y se convierta en una estación de tránsito, igual que las demás configuraciones. Aunque sufra la muerte térmica, resurgirá de ella, como el fénix de sus cenizas. En consonancia con Loschmidt, unas veces la segunda ley se infringirá y otras se acatará. Ernst Zermelo, un brillante alumno de Planck, fue quien esgrimió esta paradoja ante Boltzmann.

## La reacción de Boltzmann

Boltzmann no negó que un conjunto finito de partículas entrara en un bucle cerrado si se estuviera a una evolución infinita, pero apuntó que el primer ciclo se completaría en un plazo de tiempo tan dilatado que nadie llegara a observarlo. Calculó el periodo de recurrencia para las moléculas de gas que caben en un volumen de un centímetro cúbico, pero podía haber reducido mucho más a cuenta, para unas pocas decenas de moléculas excede la edad del universo. ¿Y quien sabe si el universo dispone de la eternidad para ejecutar sus ciclos o si el número de sus partículas no es infinito? Diez años antes del debate entre Zermelo y Boltzmann, un filósofo alemán se había dedicado al estudio de la física, obsesionado con demostrar el eterno retorno. Se llamaba Friedrich Nietzsche. La figura ilustra un ingenioso dispositivo que utilizó el sociólogo alemán Georg Simmel, incorporado en un argumento de Nicolas de Cusa, para refutar las ideas del autor de *La habitación Zarathustra*. Muestra que cuando un número finito de elementos puede adoptar un número infinito de configuraciones, estas no tienen por qué repetirse, aunque se disponga de un tiempo ilimitado.



Los tres discos giran en torno al mismo eje. En el instante  $t$ , las tres ranuras de los discos están alineadas. Cada disco gira a una velocidad constante distinta. El segundo  $t$  hace el doble de veces que el primero. El tercero  $t$  hace dos veces más que el segundo. Aunque se espere un tiempo infinito, las tres ranuras nunca volverán a alinearse.

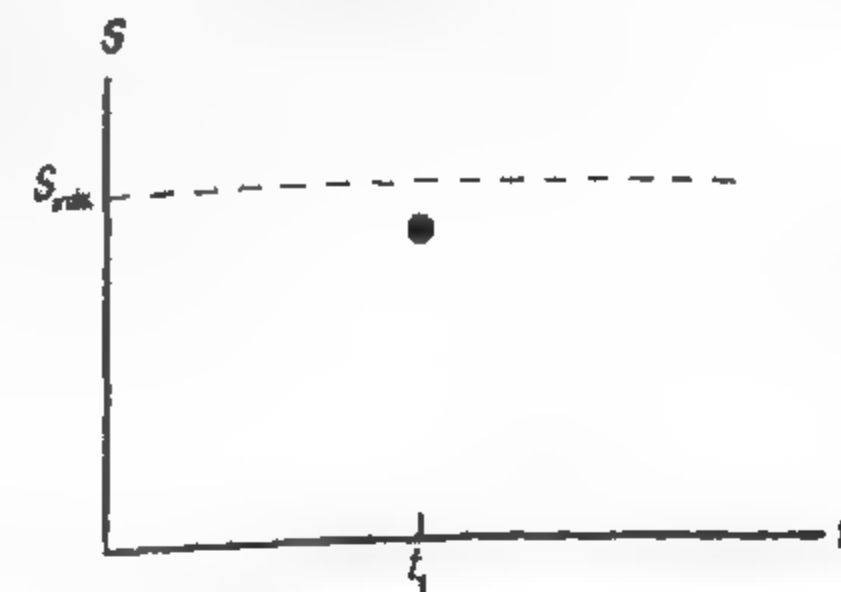


lo más probable es que nunca o casi nunca se pase por ellas. Son como pueblos abandonados. Es verdad que existen vías para alcanzarlos, que se pueden recorrer en sentido inverso para regresar al desorden, pero el sistema muy rara vez efectúa el viaje de ida y vuelta.

Los adversarios de Boltzmann no quedaron satisfechos con esta enmienda. Si el camino que conduce al orden nunca se transita, ¿de dónde procede la arquitectura del mundo que nos rodea? Cuando se encuentra un sistema en una configuración insólita, resulta razonable suponer que procede de una configuración más común, no de una más improbable todavía. La estadística prefiere considerar un estado ordenado, de baja entropía, como un accidente más o menos aislado que no como el último episodio de una larga cadena de improbabilidades, cada vez más forzada a medida que nos remontamos en el tiempo. Dando la vuelta a los argumentos de Boltzmann, se desmonta incluso la segunda ley, ya que se llega a la conclusión de que la entropía también debería aumentar hacia el pasado. Así se verifica la premisa de Loschmidt. La propensión a incrementar la entropía, como las ecuaciones fundamentales, no prefiere ningún sentido del tiempo.

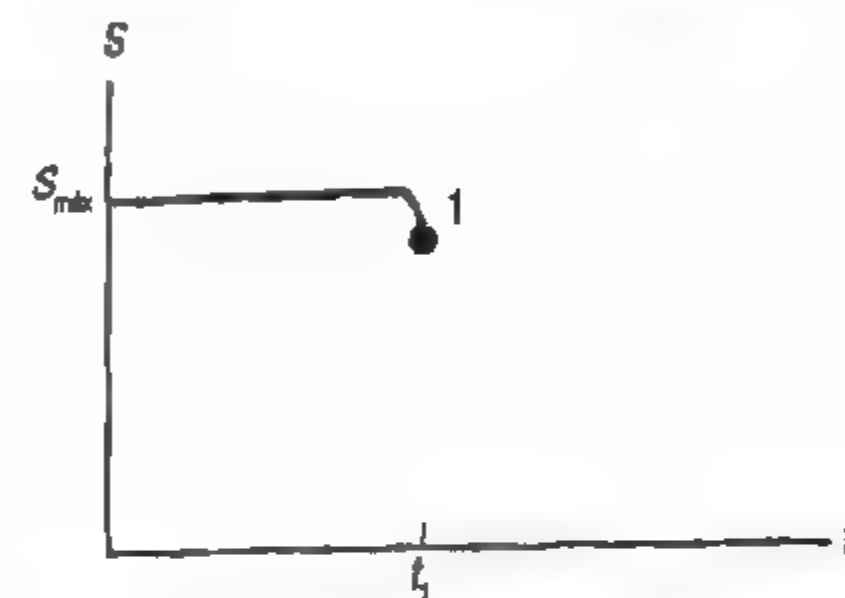
La figura 9 representa la entropía  $S$  que corresponde a la configuración de un sistema en un instante dado  $t_1$ . Muestra un valor menor que la máxima entropía alcanzable,  $S_{\text{máx}}$ . ¿Qué clase de curva se debería dibujar para reflejar la evolución más plausible que haya podido conducir al sistema hasta esa situación, la 1 o la 2 (figuras 10 y 11)? Una vez se considera lo infrecuente (el orden) como una desviación extraordinaria de lo común (el desorden) la opción 1 parece mucho más verosímil. La analogía de la película sirve, de nuevo, para aclarar las ideas. Imaginemos que ningún montador organizó nunca los fotogramas siguiendo las instrucciones de un director. La colección de ciento treinta mil fotogramas partió de una serie aleatoria que desconocemos. Desde hace años, cada segundo, se intercambian las posiciones de veinte fotogramas escogidos al azar. Si en un momento dado nos presentan la secuencia caótica de miles de fotogramas, donde sobresale un fragmento de quince segundos con

FIG. 9



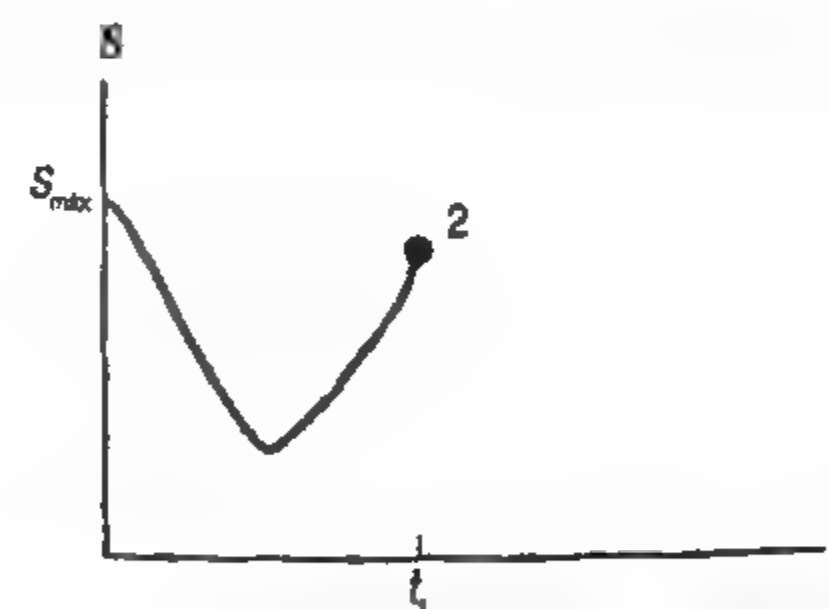
El sistema presenta en el instante  $t_1$  una entropía inferior a la máxima que puede alcanzar,  $S_{\text{máx}}$ , que se representa mediante la línea horizontal discontinua.

FIG. 10



Una posible evolución del sistema para alcanzar el estado de entropía destacado en  $t_1$  supondría una desviación ligera y fortuita del estado de equilibrio  $S_{\text{máx}}$ .

FIG. 11



El sistema también podría apartarse del equilibrio hasta un estado mucho más improbable (en el fondo de la curva), de entropía muy baja, y en su regreso al equilibrio pasar por el estado correspondiente a  $t_1$ .



sentido, ¿qué pasado se nos antoja más verosímil? ¿Una sucesión de pocos pasos afortunados que se desviaron ligeramente del absoluto desorden (curva 1) o un proceso sostenido que se remonta hasta la película completa y luego vuelve a descomponerla (curva 2)?

Dando un salto aventurado, lo que se admite para la película o el gas encerrado en un recipiente vale para el universo entero. La perspectiva que se adquiere entonces produce vértigo. Si consideramos el mundo material que habitamos como una colosal construcción montada con partículas elementales, hay que reconocer que estas se han dispuesto en un orden admirable. Nuestra cotidianidad se sustenta en un desfile de microestados rarísimos. Cualquier célula es un prodigio de complejidad. ¿Qué originó el orden anómalo que contemplamos cada día y que el paso del tiempo se ocupa de ir erosionando con tenacidad? Boltzmann se tuvo que conformar con la única salida que parecía ofrecerle su modelo. ¿Cómo es posible que una estructura del tamaño de una galaxia —las dimensiones asumidas para el universo en el siglo XIX— desafíe la segunda ley con su mera existencia? La respuesta bien pudiera ser que no todo el universo se halla en el estado que observamos. Más allá de un horizonte que no alcanzamos a divisar, predomina el equilibrio. Una frontera lejana nos separa del caos absoluto. O, si se prefiere, el universo es simétrico en promedio, pero habitamos un raro y diminuto islote de asimetría.

¿Cómo emergió ese islote? Si una pequeña secuencia con sentido puede surgir recolocando de manera aleatoria cientos de miles de fotogramas, una galaxia puede brotar merced a una fluctuación estadística descomunal, que aparte una región del universo de su estado de máxima entropía. La mayor parte del tiempo el universo se halla en equilibrio, pero a lo ancho y largo de su extensión acontecen fluctuaciones ocasionales, que incrementan el orden localmente. Cuanto mayor sea la magnitud de la fluctuación, menor será su probabilidad. ¿Qué probabilidad corresponde a toda una galaxia? Ínfima, desde luego. Tan pequeña que casi resulta ridículo tomarla en consideración. Sin embargo, esa probabilidad se vuelve mayor cuanto mayor sea

el propio universo donde se produce. Las nociones de grande y pequeño no son absolutas. En palabras de Boltzmann: «Si admitimos un universo lo bastante grande, podemos hacer la probabilidad de que una porción relativamente pequeña se encuentre en un estado cualquiera (por alejado que esté del equilibrio térmico), tan grande como deseemos». Cuando se estira la escala del espacio y el tiempo lo suficiente, el universo conocido puede verse reducido a las mismas dimensiones que un puñado de fotogramas con sentido en un océano de miles de fotogramas desordenados.

Un tiempo ilimitado deja margen a que los hielos se formen de modo espontáneo, a que las moléculas de gas se concentren en la esquina de una habitación o a que las trayectorias de infinidad de partículas compongan por puro azar millones de estrellas. La escala temporal en la que afloran estos fenómenos, cuando se transitan todos los caminos, incluidos los que visitan las configuraciones más remotas y ordenadas, desborda la imaginación. La flecha del tiempo o la segunda ley de la termodinámica no son, desde este punto de vista, principios universales, sino más bien normas locales, que se cumplen en aquellas regiones del universo donde un islote de orden se está deshaciendo (o creando). Por eso, las leyes fundamentales son simétricas: ellas se aplican a la jurisdicción íntegra del universo. Las asimetrías caracterizan el ámbito efímero y limitado de las fluctuaciones.

La flecha del tiempo nos advierte de que estamos regresando al redil de la muerte térmica. Después de un episodio de orden accidental y transitorio, volvemos al estado de máxima entropía natural en un universo inconcebiblemente grande. El viaje de retorno será largo. Al final, no obstante, el caos reinará de nuevo y se restituirá la simetría. El argumento de Boltzmann (en realidad, de uno de sus ayudantes, un tal doctor Schuetz) aguanta la primera acometida de sus detractores, pero las dudas se multiplican a medida que se profundiza en él. La amplitud de la fluctuación que demanda constituye un desafío a la credulidad casi inadmisibles. Si la aparición fortuita de una galaxia ya causa reparos, las observaciones astronómicas han expandido de forma drástica el escenario del universo desde finales del siglo XIX. Ahora estaríamos pidiendo



El origen de la vida

Es más de una ocasión, el matemático inglés Roger Penrose, al afirmar que la vida en la Tierra no depende de la energía del Sol, se refiere, por el contrario, a la energía que proviene de los rayos cósmicos, a menos la intensidad de energía que recibe. La Tierra recibe la radiación electromagnética en forma de partículas básicas, que son, en su mayor parte, fotones de luz visible y de energía menor que la de menor energía (que corresponde a la luz infrarroja, sobre todo). Pero, si las energías son iguales, debe emitir radiación en forma de fotones de menor energía. El número de radiaciones emitidas por la Tierra es muy variable en un sistema cuando está dependiente del nivel de actividad de la actividad de la Tierra.

El origen de la vida



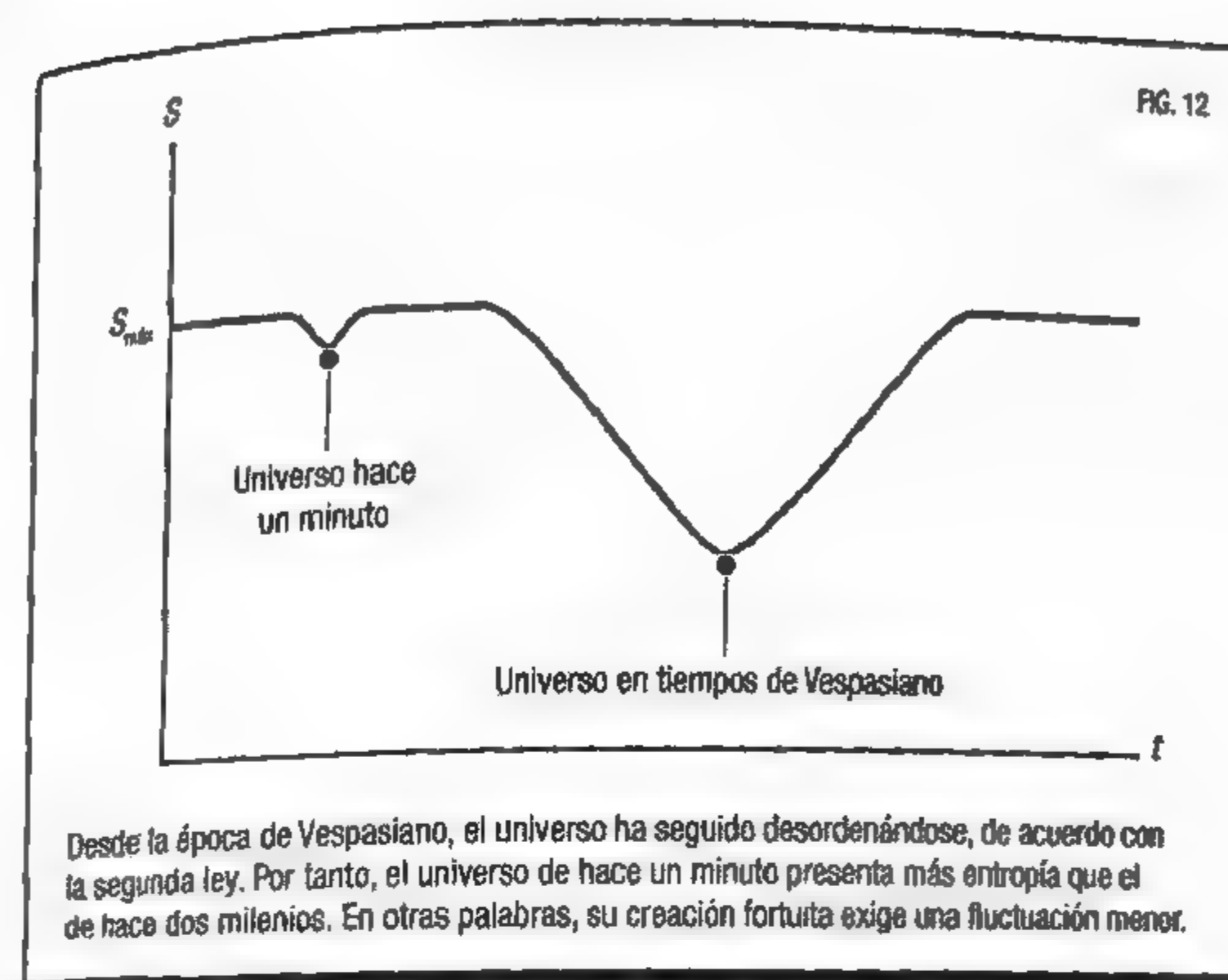
La energía llega a nuestro planeta en forma de radiación electromagnética, en un número menor de partículas, desde una dirección concreta del espacio, y así repartida entre muchas partículas, en cualquier dirección. La energía que entra en la Tierra es mucho mayor que la energía que sale. Así se establece un flujo neto de energía que se convierte en calor y en la producción local de estructuras orgánicas. La energía que entra en la Tierra es mucho mayor que la energía que sale.



una fluctuación que genere del orden de cien mil millones de galaxias. Podría aducirse que el problema radica en la ineptitud de nuestra mente a la hora de manejar escalas de tiempo y espacio grandiosas. Aun así, las fluctuaciones que pueden sobrevenir en un tiempo infinito (o casi) exigen una suspensión de la incredulidad todavía mayor. Con la eternidad a nuestra disposición, otras fluctuaciones similares a la que originó este universo acabarían ocurriendo. Todas las posibilidades serían viables. En alguna de ellas volveríamos a nacer y cometeríamos errores diferentes. En otras no llegaríamos a existir. Se materializarían cuantas alternativas históricas queramos inventar. Cleopatra no se enamoraría de Marco Antonio, Cervantes moriría en Lepanto, no se declararía la Segunda Guerra Mundial. Habría universos sin Sol, sin Saturno, sin sistema solar, sin Vía Láctea. Sin vida o rebosantes de ella. Incluso los habría que duplicarían la historia del nuestro pero a la inversa, como en una película rebobinada. Y las inversas de todos los universos alternativos.

Es cierto que la eternidad no es estrictamente necesaria y que, incluso contando con ella, no se tienen por qué dar todos los universos imaginables. En cualquier caso, para dotar de verosimilitud a una fluctuación de la magnitud de un universo, la escala de tiempo debe dilatarse hasta el punto de dar cabida a un sinfín de fluctuaciones monstruosas de un calibre semejante.

Su proliferación abre un abismo insondable bajo nuestros pies. Es más probable que las ruinas del Coliseo y nuestros cerebros, con sus recuerdos, hayan surgido hace tan solo un instante, fruto de la caprichosa combinación de una desmesurada cantidad de moléculas, que de un proceso evolutivo de millones de años. ¿Por qué? Sabemos que a medida que transcurre el tiempo la entropía crece. De ahí que la entropía del universo en la época de los romanos fuese menor que en la actualidad. Una fluctuación que construyera el universo tal como era hace un minuto forma un sistema de entropía mayor (y por tanto más probable) que otra que dé lugar al universo en tiempos de Vespasiano (figura 12). Ocurre lo mismo con la secuencia de quince segundos que aparece en mitad de miles de fotogramas desordenados. Resulta más probable que surja de una fluctuación que solo crea



la secuencia, que de una fluctuación mucho mayor que produce primero la película completa y a continuación la va desordenando. En suma, una fluctuación que origine nuestro mundo hace tan solo un segundo, con miles de libros de historia que reflejan hechos que jamás acontecieron, con ruinas de edificios que nunca conocieron su esplendor e incluso recuerdos coherentes sin ningún fundamento objetivo, sería más probable que un universo más ordenado todavía, donde se sucedieran todos los fenómenos que conducen hasta la realidad que experimentamos. Practicando una economía estricta, resulta aún más probable una fluctuación que se limite a generar el espacio donde se está leyendo este libro, con los átomos del cerebro de quien lo lee dispuestos por azar en neuronas que albergan una memoria repleta de falsos recuerdos. Y ya puestos, ¿por qué no fabricar un solo cerebro, que cree ver, sentir y evocar todo un repertorio de experiencias ilusorias?

Llegados a este punto, la pugna por justificar la flecha del tiempo nos ha llevado hasta argumentos demasiado forzados, que descansan en hipótesis que no se pueden demostrar ni refutar



mediante experimentos. La cuestión, por supuesto, es: ¿existen alternativas? Por fortuna, en 1929 Edwin Hubble hizo un descubrimiento que barrió del tablero de juego el vértigo de los falsos recuerdos y las fluctuaciones monstruosas. ¿Y si el universo no fuera una gigantesca masa de partículas sumida en el caos? ¿Y si la asimetría procede de un estado inicial de entropía mínima? ¿Y si todo comenzó con una gran explosión?

### CAPÍTULO 3

## El pasado oscuro del universo

La hipótesis cosmológica apunta a que no hay que buscar la asimetría del tiempo en las leyes de la física, sino en las condiciones de partida del universo. El Big Bang, en apariencia, procura un comienzo de muy baja entropía. ¿Qué ocasionó ese extraordinario orden inicial?



¿Cómo conjurar la imagen de una grandiosa fluctuación que culmina en un universo tan vasto, al menos, como el territorio que abarcan nuestros telescopios? La vía más expeditiva, desde luego, consiste en negar que semejante éxodo del caos aconteciera nunca, pero entonces, ¿cómo afloraron estructuras como los genes o las proteínas? Estas necesitan, como trasfondo, un amplísimo proceso de aumento de la entropía que ampare sus descensos locales. Ese entorno favorable lo proporciona un universo que evolucione a partir de una configuración muy ordenada. Su historia se convierte así en un largo viaje hacia el máximo desorden posible, que no ha experimentado todavía. Las leyes fundamentales son simétricas, pero se aplican a un sistema que procede de una situación asimétrica. Sucede algo parecido con un gas encerrado en una botella, que se guarda en el interior de una habitación. La entropía del gas es relativamente baja si se compara con la que podría adquirir al expandirse en la habitación, porque el confinamiento a un volumen de un litro limita bastante sus movimientos. Cuando la botella se descorcha, el gas no permanece prisionero. De inmediato, las moléculas exploran las nuevas posibilidades a su alcance y tienden a ocupar



toda la habitación. Ahora tienen acceso a muchos más puntos del espacio. La entropía crece. Un investigador que estudiara la evolución del gas antes de que este llegue al equilibrio detectaría un progreso imparable del desorden. ¿Qué lo ha provocado? Descubre que las leyes fundamentales que rigen la dinámica de las moléculas son simétricas, pero no observa ningún incremento sostenido de orden que contrarreste la oleada de desorganización. Advierte así una flecha del tiempo.

El investigador podría aventurar diversas hipótesis. Quizá el gas proviene del equilibrio. Ocupa toda la habitación desde tiempo inmemorial, pero fluctuaciones ocasionales disponen configuraciones ordenadas de sus moléculas debido al más puro azar. ¿Cuál es el alcance de estas fluctuaciones? Ciertamente todas las moléculas podrían haberse congregado de modo fortuito dentro de la botella para salir de ella poco después. Resulta más verosímil, sin embargo, suponer que consumaron un grado de orden menor, justo el que detectó el investigador cuando inició sus pesquisas. Una segunda explicación sugiere que el gas estaba encerrado dentro de la botella y que el tapón cedió. A partir de ese momento, su evolución vino dictada por leyes simétricas, pero su peculiar situación inicial originó una tendencia sesgada hacia el desorden. En cualquiera de las dos explicaciones, la flecha del tiempo no es una propiedad intrínseca del sistema. Mientras que en la primera caracteriza una etapa efímera de su evolución, en la segunda se deriva de unas condiciones iniciales muy peculiares.

Si aplicamos la segunda hipótesis al universo, se podría decir que empezó como un cubo de hielo ya formado, no como un volumen de agua líquida. No se ha producido ninguna congelación fabulosa, que haya desafiado paso a paso la tendencia a desordenarse de las moléculas. El orden vino de serie y las moléculas no han hecho sino seguir su tendencia natural a desorganizarse. La flecha del tiempo apunta a un inicio asimétrico. Esta aproximación al problema desde luego no lo resuelve, pero plantea un contexto más razonable, que nos permite confiar en nuestros recuerdos y en que los huesos enterrados de ictiosauro no se hayan generado espontáneamente hace unos segundos, junto a

las pinturas rupestres y la catedral de Florencia. Ahora bien, este escenario más sensato exige un precio a cambio. ¿Qué dio pie a la situación original de orden? ¿Por qué el universo arrancó en un estado de muy baja entropía? ¿Cómo vino a materializarse el hielo que se funde? Esta es la gran pregunta que pretende desentrañar la cosmología, una ciencia todavía muy joven que, hasta hace un siglo, apenas podía participar en las polémicas de sus mayores, filósofos o teólogos. Las cosas han cambiado mucho en los últimos cien años. La pura especulación ha cedido terreno ante pruebas experimentales extraordinarias. La idea de un comienzo ordenado no se fraguó en el campo de la termodinámica, como un remedio al problemático universo de Boltzmann. Fue la consecuencia de observaciones astronómicas inesperadas y de una nueva teoría sobre la gravedad.

En la misma época en la que Boltzmann se defendía de las críticas de Ostwald o Zermelo e intentaba justificar con un modelo mecánico la segunda ley de la termodinámica, el universo conocido se limitaba a una galaxia, la Vía Láctea. Es cierto que en los catálogos estelares persas del siglo I figuraban ya la nebulosa de Andrómeda y la Gran Nube de Magallanes, situadas allende la Vía Láctea, pero entonces nadie comprendía la verdadera naturaleza de estos rutilantes borrones cósmicos ni, desde luego, cómo de cerca o de lejos se hallaban de la Tierra. Hasta el siglo XX, solo se dispuso de métodos de triangulación para calcular distancias astronómicas y no arrojaban medidas fiables más allá de unos pocos cientos de años luz. Las reglas astronómicas no daban ni para sondear la Vía Láctea, cuya máxima profundidad alcanza los cien mil años luz.

El procedimiento más sencillo para estimar cuánto espacio nos separa de una fuente luminosa consiste en comparar la cantidad de luz que desprende con la fracción que nos llega. Cuanto más lejos se sitúa, menos brillante nos parecerá. Al contraponer la luz emitida con la que se recibe, se deduce la distancia responsable de la atenuación. El sistema funciona de forma impecable cuando se sabe la intensidad luminosa de la fuente, caso de una bombilla. Las estrellas, sin embargo, no se fabrican en serie con un número fijo de vatios. El rango de sus temperaturas superfi-



ciales es considerable, desde los 40 000 °C de Eta Carinae, por ejemplo, a los 3 000 °C de Betelgeuse o Próxima Centauri. Por desgracia, desde la Tierra solo podemos determinar una de las dos variables: la cantidad de luz que nos llega. El cielo nocturno despliega una extensa red de estrellas, pero ignoramos cuánta luz están emitiendo en su superficie. Para despejar la incógnita, tendríamos que viajar hasta ellas y medirla. Cuando una estrella como Sirio destaca entre las demás, ¿lo hace porque es más brillante o solo porque está más cerca?

En 1912, trabajando en el observatorio del Harvard College, Henrietta Swan Leavitt proporcionó la regla de medir con la que los astrónomos venían soñando milenios. Identificó —para una categoría muy particular de estrellas, las cefeidas— una tercera magnitud que se puede medir desde la Tierra y que permite averiguar cuánta luz emiten en su superficie. Las cefeidas son estrellas variables, es decir, su brillo oscila entre una intensidad máxima y otra mínima a un ritmo regular. Esta variación es intrínseca y no tiene nada que ver con la titilación causada por el temblor térmico de la atmósfera. Leavitt estudió veinticinco cefeidas en la Pequeña Nube de Magallanes y encontró una notable relación: cuanto menos duraban sus oscilaciones, menos luminosas eran las estrellas. El periodo de una cefeida se convierte así en una etiqueta que nos indica cuál es su potencia. Basta con localizar una dentro de un grupo de estrellas, para automáticamente estimar la distancia de aquellas que la rodean. Las cefeidas se han comparado con piedras miliare o hitos cósmicos que marcan distancias en cualquier dirección, superando los límites que imponían los tradicionales métodos de triangulación. Una vez que los astrónomos comprendieron las implicaciones del trabajo de Leavitt, se apresuraron a buscar cefeidas por las cuatro esquinas del firmamento, para dar profundidad a las cartas estelares, planas hasta entonces.

A esta tarea se entregó Harlow Shapley en 1918, con el propósito de establecer las dimensiones de la Vía Láctea. Armado con el telescopio más potente del mundo, en el observatorio de Monte Wilson, fue capaz de levantar un mapa aproximado de la galaxia, localizar su centro y la posición del sistema solar. La

ubicación del Sol, en un barrio marginal de la Vía Láctea, supuso el segundo gran varapalo cósmico a la autoestima humana, después de que Copérnico nos desplazara del centro del universo. Shapley también estimó el diámetro de la Vía Láctea: 300 000 años luz. ¿Había logrado acotar toda la extensión del cosmos? Él estaba convencido de que así era. En aquellos años arreciaba la controversia en torno a si las nebulosas se acomodaban dentro de nuestra galaxia o si había que concederles la dignidad de reinos estelares independientes, «universos-isla», como las había denominado Immanuel Kant. Shapley defendía con vigor su naturaleza local. Seis años después, Edwin Hubble zanjó la polémica en su contra. En el mismo observatorio que Shapley, pero estrenando un telescopio más potente aún —un maravilloso reflector de dos metros y medio—, sorprendió una cefeida en la nebulosa de Andrómeda y así pudo situarla a una distancia de 900 000 años luz. La nebulosa residía, por tanto, fuera de los confines que Shapley había fijado para la Vía Láctea. Se trataba de otra galaxia. Los cálculos de Shapley y Hubble no eran del todo precisos, pero las correcciones posteriores no han invalidado sus conclusiones. La primera expansión del universo tuvo lugar en la mente de los astrónomos, que vieron cómo su campo de estudio, ya de por sí desmesurado, se agigantaba. Si en 1924 Hubble pudo afirmar que el cosmos se componía al menos de dos galaxias, nueve décadas después el censo asciende a cien mil millones y todavía no se ha completado.

El descubrimiento de Hubble fue sensacional, pero la verdadera conmoción estaba aún por llegar. En torno a 1914, otro astrónomo, Vesto Melvin Slipher, había hallado que un puñado de nebulosas se estaba alejando de la Tierra a una velocidad pasmosa, de varios cientos de kilómetros por segundo. Tan vertiginosa fuga carecía de contexto, porque Slipher ignoraba su posición. ¿Corrían dentro o fuera de la Vía Láctea? Hubble despejó la duda, de nuevo gracias a unas oportunas cefeidas. Al combinar velocidades y distancias surgió una relación lineal. La velocidad de fuga de las galaxias resultó proporcional a su lejanía: cuanto más remotas, más se apresuraban. Una galaxia situada a una distancia diez veces mayor que otra se alejaba diez veces más deprí-



sa. En un lenguaje más conciso:  $v = H_0 d$ , donde  $v$  es la velocidad radial (de retroceso),  $d$ , la distancia de la galaxia al observador, y  $H_0$ , la constante de Hubble.

¿El fenómeno se circunscribía a un reducido grupo de nebulosas díscolas o se trataba de una huida generalizada? ¿Había descubierto Hubble que el universo se halla en expansión? Los escasos datos que había conseguido recabar le bastaron para conjeturar una tendencia universal, pero tomó como referencia un modelo cosmológico donde el espacio no se expande, de modo que las nebulosas se retiraban a su través, como lo haría un cometa o una nave espacial. De entrada, parece la conclusión más razonable. Aun así, en el momento en el que Hubble hizo públicas sus suposiciones ya existía un marco teórico que ofrecía una interpretación más sorprendente y sofisticada de la estampida galáctica: la teoría de la relatividad general. Esta permite que sea el propio espacio quien separe las nebulosas de la Tierra. El matiz es importante. En un caso, la Tierra recupera una sospechosa posición central; en el otro, su localización se iguala a la de cualquier otro astro. La teoría de la relatividad general marcó el rito de paso de la cosmología, de la infancia a la edad adulta. Sus ecuaciones contienen las instrucciones para fabricar infinitud de universos. Algunos físicos teóricos, Einstein a la cabeza, ya habían comenzado a jugar con ellas. Los modelos que construyeron proporcionaban los resortes necesarios para dar cuerda a la expansión.

## MODELOS COSMOLÓGICOS

Uno de los grandes hitos de la historia de la ciencia es la ley de gravitación universal de Newton, que concede a la gravedad una influencia instantánea e ilimitada. Su fuerza de atracción afecta a cualquier pareja de masas, con una intensidad que depende de sus magnitudes ( $m_1$  y  $m_2$ ) y de la distancia ( $d$ ) que las separa. Salvo una constante ( $G$ ), la ecuación no incluye nada más:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

No se contemplan más variables. De ahí que cuando una masa cualquiera cambia de posición, afecte de inmediato a todas las demás, por muy lejos que se encuentren. Un detector gravitatorio con sensibilidad suficiente podría advertir estas perturbaciones y, así, las masas se podrían aprovechar para armar un sistema de comunicación instantáneo. La idea no podía repugnar más a Einstein, que en 1905 —con la teoría de la relatividad especial— había decretado que nada, ni siquiera el influjo gravitatorio, debía superar la velocidad de la luz. Había que desarrollar un nuevo mecanismo que transmitiese más despacio los cambios que se producen en las distribuciones de la materia. Einstein encomendó esa tarea al propio espacio. O siendo más precisos, al espacio-tiempo, ya que en la relatividad especial, el espacio y el tiempo se fusionan para crear una entidad superior, cuya estructura se asienta en cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal).

En 1904 el matemático inglés Charles Howard Hinton publicó *La cuarta dimensión*. El libro contenía un apéndice donde se daban instrucciones detalladas para fabricar 81 cubos de colores. Su estudio concienzudo garantizaba al lector paciente la capacidad de visualizar una cuarta dimensión. Cuenta la leyenda que muchos que probaron la experiencia acabaron en la celda acolchada de un hospital psiquiátrico. Dado que pensar en cuatro dimensiones entraña ciertos riesgos, nos contentaremos con una analogía tridimensional. Si lanzamos una canica sobre una sábana elástica y la manteamos con suavidad, la inercia hará que bordee las prominencias y se precipite por las pendientes, perdiéndose en el dibujo de una multitud de trayectorias. El relieve que adopta la sábana —su geometría—, que podemos modificar en cada instante, determina la dinámica de la canica: podemos hacer que progrese en línea recta, acelerarla para que trace una parábola o describa una órbita cerrada alrededor de un centro.

A su vez, la canica deforma la superficie en la que se apoya. Una segunda canica que se hiciera rodar en línea recta sobre la sábana pronto se desviaría siguiendo la pendiente que origina el peso de la primera. Si la sábana fuera de un material perfectamente transparente, interpretaríamos que una fuerza misteriosa



ejerce una atracción inmediata, a distancia, sobre la canica en movimiento, una fuerza que parece emanar del centro de aquella que permanece en reposo, sin que en ningún momento se nos ocurra atribuir lo que vemos a la interacción con una sábana-espacio que sostiene a ambas. Einstein supo adivinar su presencia. En caso de que hagamos rodar una tercera canica sobre la sábana, alterará la dinámica de las dos primeras y estas a su vez afectarán la trayectoria de la recién llegada. Todas las perturbaciones se transmiten a través de los cambios en la disposición de la sábana-espacio, que se propagan de modo gradual, a la velocidad de la luz, y no mediante un decreto instantáneo.

La analogía de la sábana proporciona una intuición de lo que sucede con el movimiento de los cuerpos en un campo gravitatorio. En la teoría de la relatividad general, la atracción gravitatoria es una manifestación de la forma del espacio-tiempo. Las masas se desplazan buscando siempre la trayectoria más corta entre dos puntos, que condicionan los valles, pendientes y crestas de una geografía tetradimensional tornadiza. Esta evoluciona de acuerdo con las masas; o con las energías, como ya se había ocupado de precisar también Einstein:  $E=mc^2$ . Ante la mirada relativista, las fuerzas instantáneas de Newton se desvanecen y los cuerpos recorren con libertad una orografía inconstante, que masas y energías modelan conjuntamente. En palabras del físico John Wheeler: «El espacio le dice a la materia cómo debe moverse, y la materia le dice al espacio cómo debe curvarse».

Puesto que la relatividad liga el espacio-tiempo con la distribución de materia-energía que alberga, si logramos inventariar esta última para todo el universo, podremos conocer no solo su geometría, sino también sus mutaciones, pasadas y futuras. En otras palabras, sabremos qué estructura tiene el universo, cómo surgió y cuál es su destino. Esta hipotética operación resulta impracticable, por las mismas razones por las que no se puede determinar la dinámica de un gas introduciendo en las ecuaciones de Newton, una a una, la posición y velocidad de cuatrillones de moléculas. Nada impide, sin embargo, intentar una aproximación y suponer una distribución uniforme de materia para toda la extensión del universo. Sin duda, la realidad es mucho más

abrupta. En su mayor parte, el espacio está vacío, con la irrupción ocasional de estrellas, planetas o nubes de gas. No obstante, si uno entorna los ojos para difuminar el paisaje cósmico y mira en cualquier dirección, no advierte irregularidades en la distribución de la materia. Sucede lo mismo con el gas encerrado dentro de un recipiente, donde la densidad microscópica, punto a punto, tampoco es uniforme. O encuentras vacío, o tropiezas con una molécula. Ahora bien, si uno escoge dos volúmenes de  $1\text{ cm}^3$ , separados una cierta distancia, aunque no contengan la misma cantidad de moléculas ni estas se sitúen en las mismas posiciones, podemos considerarlos equivalentes. El promedio de una perspectiva macroscópica es incapaz de distinguirlos. El gas parece exhibir una perfecta homogeneidad. De manera semejante, dos cubos colosales, de cientos de millones de años luz de arista, no contendrán el mismo número de estrellas ni estas se dispondrán en las mismas coordenadas, pero, *grosso modo*, desde la perspectiva que brinda una escala astronómica, resultan equivalentes. La densidad media, promediada, no varía.

Einstein armó el primer modelo de universo relativista en 1917, con la distribución uniforme de materia y energía que acabamos de plantear. En él no existían butacas privilegiadas. Cualquier observador que se desplazara una distancia arbitraria o que girase sobre sí mismo un ángulo cualquiera, en esencia disfrutaba del mismo espectáculo que antes (condiciones de homogeneidad e isotropía). Sucede en ocasiones que las ecuaciones físicas parecen cobrar vida autónoma y arrojan predicciones inesperadas para sus propios creadores. En el caso de la relatividad general, Einstein descubrió que, dejadas a su aire, las ecuaciones auspiciaban un espacio-tiempo que tendía a contraerse o expandirse. Esta vocación dinámica le desagradó. Compartía la visión del universo de la mayoría de sus contemporáneos: una galaxia inmóvil, varada en el infinito y la eternidad. En cada vecindario, los astros gozaban de cierta libertad de movimientos, pero no alteraban el marco mayestático del espacio-tiempo, que se mantenía inamovible. Las ecuaciones eran nuevas, pero se sometieron a una representación vieja. De atender a su plasticidad innata, Einstein hubiera podido aumentar su prodigioso palma-



El motivo por el que el Big Bang agrada a los científicos es que el libro del Génesis eclipsa su entendimiento. La creencia en la primera página del Génesis yace bien enterrada en la psique de la mayoría de los científicos.

FRED HOYLE

se expandían o que pasaban por fases sucesivas de expansión y contracción. La primera persona que conjugó con acierto estas especulaciones con las observaciones astronómicas más recientes fue un sacerdote belga, Georges Lemaître, dos años antes de que Hubble dedujera su ley de expansión. Lemaître había estudiado a fondo la obra de Einstein y también había visitado los observatorios de Monte Wilson y del Harvard College. En cuanto tuvo conocimiento de la fuga galáctica de Slipher —que Arthur Eddington había calificado como «uno de los problemas más desconcertantes» de la astronomía—, no tardó en atar cabos.

Lemaître propuso que las galaxias de Slipher no huían a través del espacio, como haría un proyectil. Su retirada se debía a la dilatación del propio tejido del espacio (figura 1). La sábana elástica de nuestra analogía relativista, al darse de sí, alejaría las canicas que descansan sobre ella, aun cuando estas no presenten ningún movimiento propio. Lemaître supuso las mismas condiciones de isotropía y homogeneidad que Einstein, lo que, en un espacio-tiempo bidimensional en expansión, equivale a inflar un globo o a estirar de modo uniforme el tejido de una sábana infinita. Ambos modelos ilustran que las galaxias no huyen de la Tierra. Cualquier observador en el universo asiste al mismo repliegue, en el que además participa. Lemaître examinó con cuidado su modelo de universo y calculó su ritmo de expansión, derivando la ley de Hubble dos años antes que el estadounidense (figura 2). Publicó sus resultados en francés en los *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, una revista con escasa repercusión internacional. Hasta donde sabemos, Hubble no leyó

rés científico presagiando la expansión del universo.

En 1922 el ruso Alexander Friedmann se aproximó a las ecuaciones de la relatividad general con menos prejuicios, o con más ganas de experimentación, y se entretuvo viendo qué podían dar de sí cuando nadie las encorsetaba. Un espacio-tiempo sin cortapisas animaba universos que

Las galaxias pueden alejarse a través de una sábana-espacio estática.

Sábana estática

O pueden alejarse, incluso permaneciendo inmóviles, si es la sábana-espacio la que se dilata.

FIG. 1

FIG. 2

La ley de Hubble: si el espacio se estira el doble, se duplican las distancias en el mismo tiempo. Cada punto advierte que los demás se alejan a una velocidad proporcional a su distancia.



el artículo de Lemaître hasta que se tradujo al inglés en 1931. Por razones que se desconocen, en la traducción se omitieron las páginas donde Lemaître anticipaba el cálculo de la constante de Hubble.

Para Lemaître, la expansión del universo traía implícito un origen. El cosmólogo Fred Hoyle, por el contrario, veía prejuicios religiosos en este salto deductivo hacia un mito fundacional. En un programa de radio de la BBC motejó la propuesta de Lemaître de «gran petardazo» (*big bang*). La etiqueta ya no se desprendería y contribuyó a la popularización de la hipótesis que pretendía ridiculizar, para disgusto de Hoyle. ¿El Big Bang favorece o condena la posibilidad de una entropía baja para el universo más joven? ¿Qué tiene que decir sobre el origen de la flecha del tiempo?

## EL VIAJE MÁS LARGO

La conciencia de que el universo se expande incita casi de inmediato a rebobinar su historia con la imaginación, para asistir al prodigioso desfile de toda la materia, que iría convergiendo hasta concentrarse en un solo punto. La expansión parece sugerir tácitamente un comienzo, pero, por desgracia, las mismas ecuaciones que apuntan a él colapsan antes de alcanzarlo. En la versión clásica de la teoría, el primer fotograma de la película cosmológica encierra una singularidad, un punto donde las leyes de la física se rompen. A medida que se retrocede en el tiempo, la sábana del espacio-tiempo se contrae y la energía se aprieta en volúmenes cada vez más pequeños, mientras la temperatura aumenta sin tregua. Si llevamos el proceso hasta sus últimas consecuencias, el volumen se reduce a cero y la densidad y la temperatura se disparan hasta el infinito. Las ecuaciones revientan. Veremos que hay modos de abordar esta incómoda situación, pero, por el momento, denominaremos Big Bang a la singularidad y la apartaremos a un lado. Nos vamos a centrar en el estado del universo un segundo después. Entonces la densidad de energía no rayaba en el infinito, pero era tan elevada que

los constituyentes básicos de la materia y la radiación, las partículas elementales, se sumían en un estado hiperexcitado, muy lejos del sosiego necesario para coaligarse en núcleos atómicos o en los elementos químicos más sencillos, por no hablar de sistemas más complejos, como estrellas o planetas. Este caos de temas más complejos, dominados por un azar violento, incapaces de consolidar ninguna estructura material, se conoce con el nombre de plasma o, en un tono más informal, «sopa primordial». La radiación electromagnética estaba presente en forma de fotones, que impregnaban cada región del espacio. La temperatura rondaba los diez mil millones de grados.

La expansión enfrió el universo, el frenesí de las partículas se aquietó y las interacciones dieron lugar a ligaduras menos efímeras. Al bajar del límite de los diez millones de grados, cuajaron los primeros núcleos atómicos. Los neutrones y protones empezaron a completar las casillas más altas de la tabla periódica: hidrógeno, helio y litio. Al cruzar la barrera de los tres mil grados, unos trescientos mil años después de la singularidad, los electrones se estabilizaron alrededor de los núcleos y formaron átomos.

Un plasma se puede definir como un gas de partículas con carga eléctrica, como los quarks (componentes de los neutrones y protones) y los electrones. La carga establece un fuerte vínculo entre estas partículas y los fotones. Cualquier objeto cargado emite y absorbe luz, mientras que los neutros la ignoran. En el barullo y la aglomeración que reinaban en el universo temprano, los quarks y los electrones absorbían y emitían fotones sin tregua. La luz no podía dar un solo paso sin que la importunasen. Esta constante interacción garantizaba el equilibrio, como hacen las colisiones entre las moléculas de un gas. Al enclaustrarse los quarks dentro de protones y neutrones y vincularse los electrones a los núcleos, compusieron entidades eléctricamente neutras y cesó el acoso constante a la luz. Los fotones pudieron recorrer el espacio a sus anchas por primera vez. El universo se volvió transparente. Los fotones liberados ya solo sufrieron accidentes fortuitos al topar con alguna porción de materia, en un universo cada vez más holgado. Esa porción de materia bien podría formar parte de la antena reflectora de un radiotelescopio



## PREGUNTAS FRECUENTES ACERCA DE LA EXPANSIÓN

### ¿Puede superar la velocidad de la luz?

La expresión de Hubble establece que la velocidad con la que otras galaxias se alejan de la Vía Láctea resulta proporcional a la distancia que media entre ellas, luego, a partir de una cierta separación, rebasará la velocidad de la luz. ¿No se viola así uno de los principios sagrados de la relatividad? La respuesta es que no. La relatividad limita la velocidad de la materia a través del espacio, no el ritmo al que se dilata el espacio mismo. Una galaxia remota puede alejarse de nuestro planeta más deprisa que la luz a causa de la expansión y, al mismo tiempo, encontrarse en perfecto reposo en relación con sus inmediaciones. Sin moverse, no infringe ningún límite de velocidad. Es el propio espacio el que la aparta de la Tierra y la relatividad no impone ninguna restricción a este efecto.

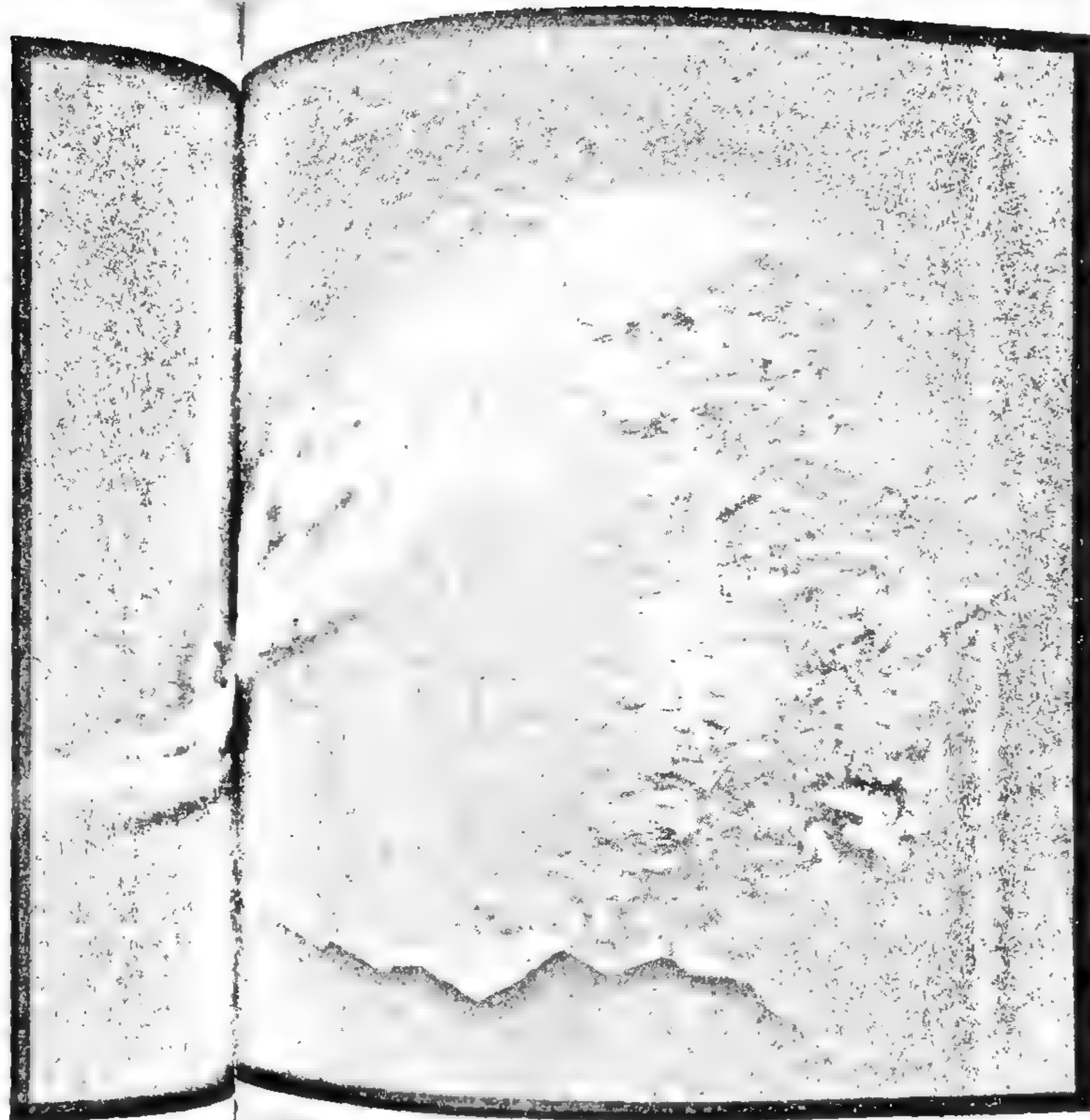
### ¿Todas las galaxias se alejan de la Tierra?

No. El movimiento de cada galaxia combina el retroceso que le impone la expansión con la trayectoria que siga a través del espacio. Igual que una persona puede remontar unas escaleras mecánicas que bajan, una galaxia que se dirija hacia la Tierra puede acercarse más deprisa de lo que la aleja la expansión. Es el caso de la galaxia Andrómeda, que se aproxima a la Vía Láctea a unos 110 km/s. Se estima que ambas colisionarán dentro de unos cuatro mil millones de años.

### ¿Agranda los objetos?

Si se pinta un dibujo sobre una lámina elástica y esta a continuación se estira, el dibujo aumentará de tamaño. ¿No debería suceder algo semejante con las estrellas, los planetas y nuestro propio cuerpo? Si la expansión separa las galaxias, ¿por qué no hace lo mismo con los átomos que componen la materia? Lo cierto es que un dibujo no tiene ninguna fuerza que oponer al estiramiento, mientras que las interacciones nucleares, electromagnéticas y gravitatorias garantizan la cohesión de la materia en las distancias cortas (astronómicamente hablando). Solo a escala cósmica la atracción gravitatoria entre galaxias no dispone de fuerza suficiente para resistir la deriva de la expansión.

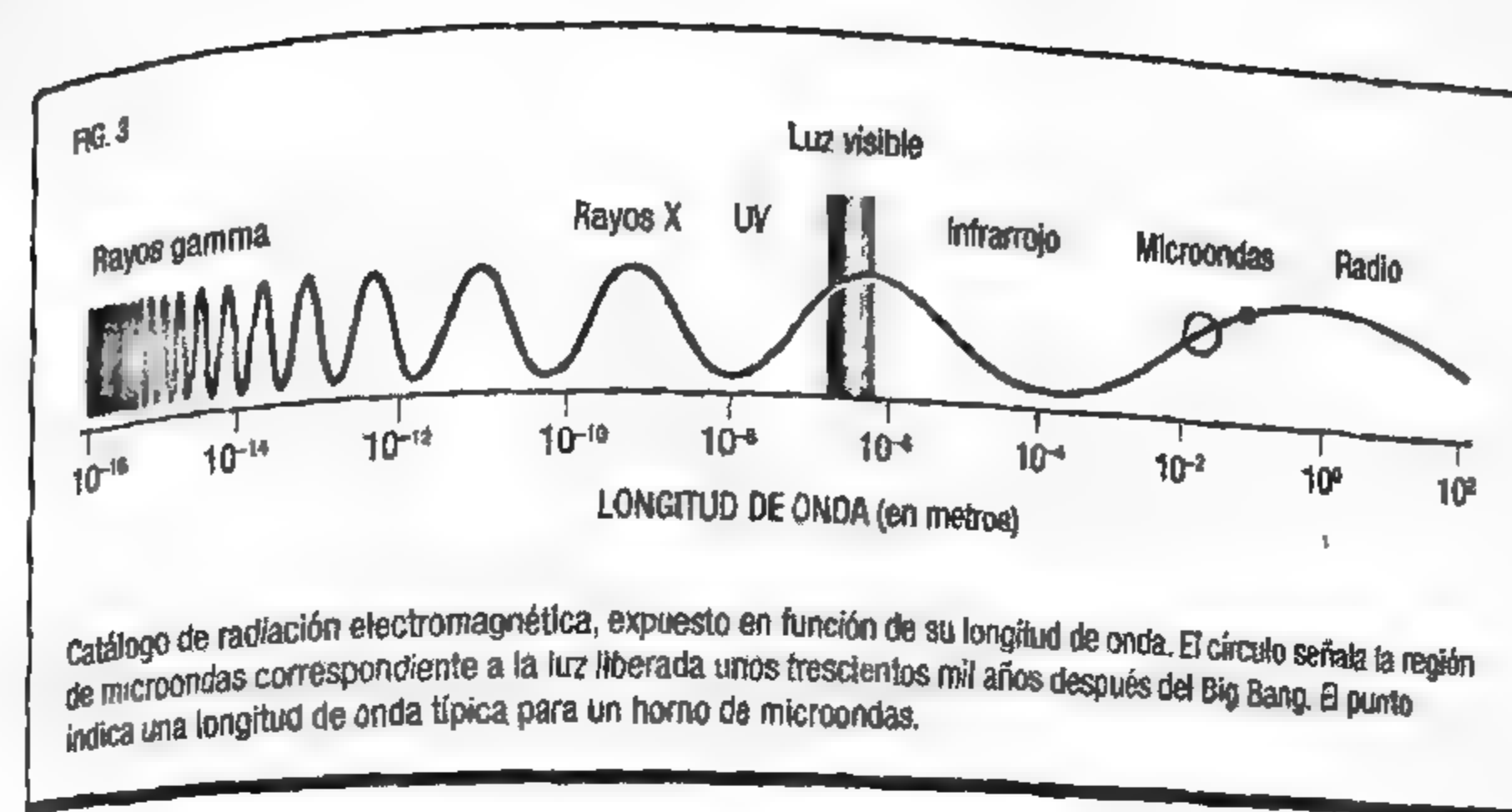
Montaje fotográfico que recrea la colisión entre la galaxia Andrómeda y la Vía Láctea, tal como se vería desde la superficie de la Tierra.





terrestre, fabricados catorce mil millones de años después. En el curso de un viaje tan prolongado, los fotones cambiaron. El espacio, a medida que se estiraba, fue alargando su longitud de onda y mermando su energía. De luz infrarroja, con un toque de luz visible rojo-anaranjada, pasaron a invisibles microondas (figura 3). Cuando se emanciparon de los electrones y quarks tenían la temperatura ambiente: 3000 K (grados absolutos de temperatura). La odisea hasta la Tierra los refrigeró hasta los 2,73 K (unos  $-270^{\circ}\text{C}$ ).

Se puede considerar que esos fotones integran el registro histórico más antiguo que se conoce. Lo que sucediera antes pertenece a la prehistoria del universo. La cronología tampoco es definitiva y quizá cambie pronto si las ondas gravitacionales nos proporcionan registros más remotos. Ralph Asher Alpher y su director de tesis, George Gamow, reconstruyeron a grandes rasgos esta crónica de la fundación de los primeros átomos en un artículo de 1948. A Gamow, en ocasiones, le perdía su sentido del humor y no pudo resistir la tentación de incluir en la lista de autores a su amigo Hans Bethe, para que estuviera firmado por Alpher, Bethe y Gamow (una cómica alusión a las tres primeras letras del alfabeto griego: alfa, beta y gamma). Sin querer, la revista *Physical Review* remató el chiste al publicar el artículo el día de los inocentes. La broma surtió efecto y el ensayo ganó fama con el nombre de «artículo alfabético». A Alpher no le hizo tanta gracia, ya que Bethe gozaba de un enorme prestigio, al igual que Gamow, y sospechó que engrosar la compañía de nombres ilustres no haría sino eclipsar el suyo más todavía. Poco después, Alpher, en colaboración con Robert Herman, dedujo la existencia de los fotones peregrinos, liberados durante la constitución de los primeros átomos. De acuerdo con sus cálculos, integrarían una radiación electromagnética de fondo uniforme, a 5 K ( $-268^{\circ}\text{C}$ ), que permearía todo el espacio. Esta muestra palpable de un pasado que se perdía en la noche del espacio-tiempo supondría un hito sin precedentes en la física experimental. ¿Podría medirse? Cuando la radiación se encuentra en equilibrio con la materia, su energía se concentra en un rango de longitudes de onda que solo depende de la temperatura. A unos



3000 K —la mitad de grados que marcaría un termómetro en la superficie del Sol—, son las ondas de luz infrarroja las que transportan la energía. A unos 5 K, se ocupan las microondas. Alpher y Herman consultaron a varios expertos en radar que les convencieron de que sería imposible detectar ondas tan débiles.

Robert Dicke, en colaboración con Phillip James Peebles, Peter Roll y David Wilkinson, concibió una versión más refinada de la misma historia casi dos décadas después, de forma independiente. Dicke estaba en disposición no solo de elaborar conjeturas, sino de verificarlas, ya que su talento físico se desenvolvía con envidiable soltura tanto en el terreno teórico como en el experimental. Había diseñado un radiómetro —un aparato que mide la intensidad de la radiación— extremadamente sensible a las microondas. Con la asistencia de dos jóvenes investigadores, Roll y Wilkinson, se aprestó a la caza de la tenue radiación de fondo. Desmintiendo la máxima de que quien busca encuentra, la caprichosa providencia entregó la ubicua señal de microondas, no a quienes la estaban buscando con más ahínco, sino a quienes no sabían cómo desprenderse de ella. Dos radioastrónomos de los Laboratorios Bell, Robert Wilson y Arno Penzias, llevaban un año intentando eliminar un molesto ruido de fondo en la antena de su radiotelescopio, que crepitaba día y noche, en primavera y en otoño, atacándoles desde los cuatro puntos



## TENSAR LA LUZ

La luz ocasiona un amplísimo abanico de fenómenos y, a lo largo de los siglos, se ha descrito recurriendo a formalismos matemáticos muy diversos, incluso antagónicos. Ha sido —sucesiva o simultáneamente— una línea geométrica, una onda, una partícula y, en su penúltima encarnación, la perturbación energética de un campo cuántico. En función de la escala a la que se observe, basta con una u otra aproximación. De acuerdo con la descripción ondulatoria, la luz se caracteriza por dos rasgos: su amplitud (o altura) y su longitud de onda (su grado de compresión o estiramiento). La luz de longitud de onda corta parece aplastada, con muchas subidas y bajadas si se compara con la luz de longitud de onda larga, que se muestra más estirada. Las ondas cortas transportan más energía que las largas. Se puede comprender el motivo teniendo en cuenta dos aspectos de la luz. Por un lado, su velocidad ( $v$ ) es constante. Por otro, afecta a las partículas con carga eléctrica, como los electrones ( $e$ ). Un electrón que se cruce con una onda luminosa sube y baja al ritmo que le imponga la sucesión de sus crestas y valles. De dos ondas que se desplacen a la misma velocidad, una corta y otra larga, la primera agitará más veces por segundo a un electrón que la segunda. Al agitarlo más, le comunicará más energía (figura 1).

Longitud de onda corta

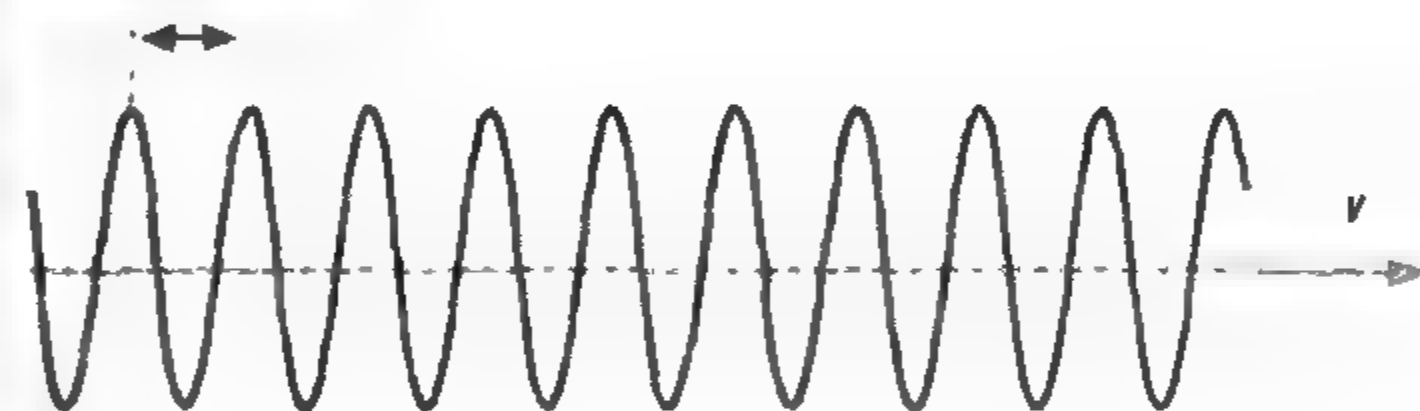


FIG. 1

Longitud de onda larga

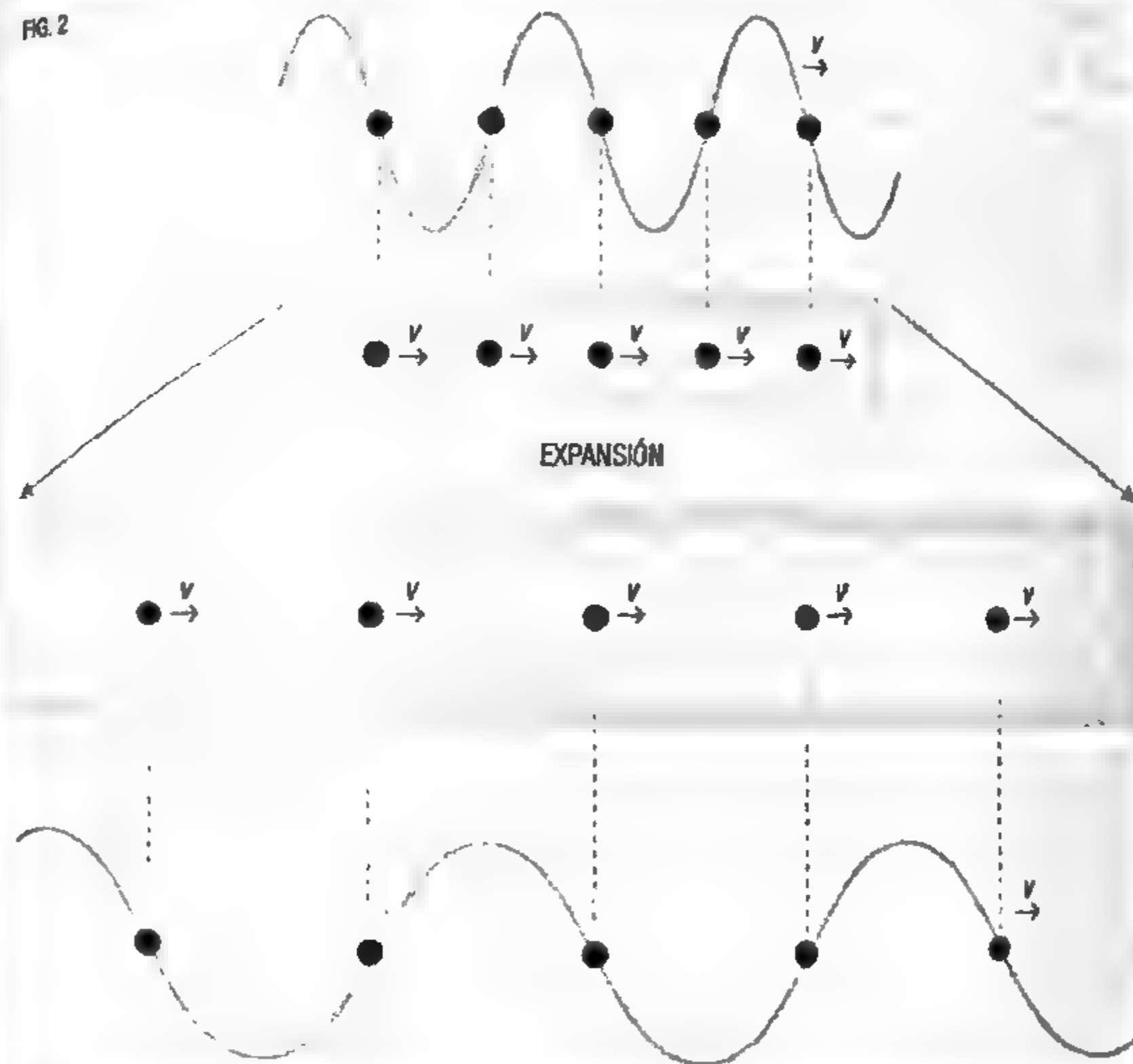


Dos ondas luminosas con distintas longitudes de onda, una corta y otra larga, imprimen un vaivén vertical a dos electrones. Como viajan a la misma velocidad, el electrón de arriba oscilará más veces por segundo que el de abajo.

## Onda expansiva

¿Cómo afecta la expansión a las ondas de luz que recorren el universo? Para verlo mejor, vamos a representar el «esqueleto» de una onda mediante una hilera de esferas, separadas por la misma distancia (la mitad de su longitud de onda). Las esferas ruedan en la misma dirección y sentido, con idéntica velocidad  $v$ , sobre una superficie (figura 2). Si se crea nuevo espacio entre las esferas de modo homogéneo, su velocidad no se verá alterada, pero aumentará la distancia —igual— que las separa. Trasladando el esquema de las esferas de vuelta a la estructura de crestas y valles de la luz, se comprueba que su longitud de onda se alarga con la expansión.

FIG. 2



Con la expansión se crea más espacio entre las esferas. No cambia la velocidad de la luz, pero sí su longitud de onda, que aumenta.



cardinales. Se habían vuelto locos intentando deshacerse de él. Lo habían probado todo, hasta atrapar las palomas que habían anidado en el plato de la antena y rascar meticulosamente sus excrementos. Descartaron que las microondas procedieran de los componentes del radiotelescopio, de Nueva York, de una prueba nuclear en el Pacífico, de cualquier punto de la Tierra, de la atmósfera, de los cinturones de Van Allen, del sistema solar o

Nos agradó saber que el misterioso ruido de nuestra antena tenía una explicación, del tipo que fuera, en especial una con implicaciones cosmológicas tan significativas.

ROBERT WILSON

de la Vía Láctea. ¿Qué ubicua fuente extragaláctica podía estar acribillando su antena? Al conocer el trabajo teórico del grupo de Dicke, se dieron cuenta de que nunca lograrían suprimir la interferencia. Estaban sintoniando nada más y nada menos que la emisión de radio más antigua del universo. Dicke, tras recibir la llamada de Penzias comunicándole su descubrimiento fortuito, transmitió la mala noticia a Roll y Wilkinson: «Nos han pisado la exclusiva».

Con el paso de los años se han obtenido registros precisos, que reproducen en todo su esplendor la desconcertante monotonía de esta radiación de fondo que llega a la Tierra desde cada punto del firmamento. Entre 2009 y 2013 el observatorio espacial Planck de la ESA se ocupó de cartografiar el paisaje de las microondas en alta resolución. Las variaciones en la temperatura de la luz, que reflejan las fluctuaciones en la densidad del universo primitivo, no superan la cienmilésima de grado. Si nuestros ojos fueran capaces de percibir microondas, veríamos el ruido que atormentaba a Penzias y Wilson como una sutil fosforescencia, que añadiría un toque espectral al cielo nocturno. El mismo resplandor alumbra cualquier rincón del universo, sumido en un baño de cuatrocientos fotones por centímetro cúbico. Aunque se han buscado explicaciones alternativas al fenómeno, ninguna encaja tan bien como la hipótesis del Big Bang, que reconoce en esa radiación a los legendarios fotones que rompieron las cadenas de los quarks, electrones y protones cuando estos se estabilizaron en materia eléctricamente neutra.

El fondo cósmico de microondas proporciona una instantánea del universo poco antes de cumplir los 380 000 años. Corrobora el relato que se inicia poco después de la singularidad, con un plasma extremadamente denso y caliente en equilibrio. Una excelente noticia para Lemaître y los partidarios del Big Bang, pero un duro golpe para nuestro intento de justificar la flecha del tiempo. Un plasma en equilibrio equivale termodinámicamente a un gas encerrado en un recipiente, cuyas partículas deambulan con despreocupación por todo su volumen. La radiación de fondo nos entrega el negativo de la imagen que buscábamos. Su extraordinaria uniformidad nos habla de una situación de máxima entropía y equilibrio térmico. Uno de los grandes protagonistas de la fotografía, empero, no sale retratado y da un vuelco a su interpretación.

## LA HISTORIA DE LA ENTROPÍA

Al echar un vistazo al gas de Boltzmann, nos sorprendería encontrar todas sus moléculas formando una bola apretada en el centro del recipiente. Para contar con una probabilidad razonable de contemplar un macroestado de entropía tan baja, tendríamos que esperar un lapso de tiempo que excede cualquier expectativa de supervivencia de nuestra civilización. En el gas de Boltzmann las partículas interactúan mediante colisiones. Para describir el universo, sin embargo, debemos incorporar más interacciones fundamentales. Ya no podemos ignorar el electromagnetismo, las fuerzas nucleares o la gravedad. Bajo su influjo combinado, la materia busca otra clase de equilibrios más complejos.

En cuanto dejamos que intervenga la gravedad, las bolas apretadas de gas pierden su condición de acontecimientos extravagantes e inobservables. Basta con alzar la mirada una noche despejada: el cielo está lleno de ellas. ¿Qué son si no las estrellas? La gravedad adquiere poco protagonismo cuando las masas son muy pequeñas, la densidad se mantiene baja, otras interacciones más intensas prevalecen o la elevada energía cinética de las partículas enmascara su influencia. En una escala

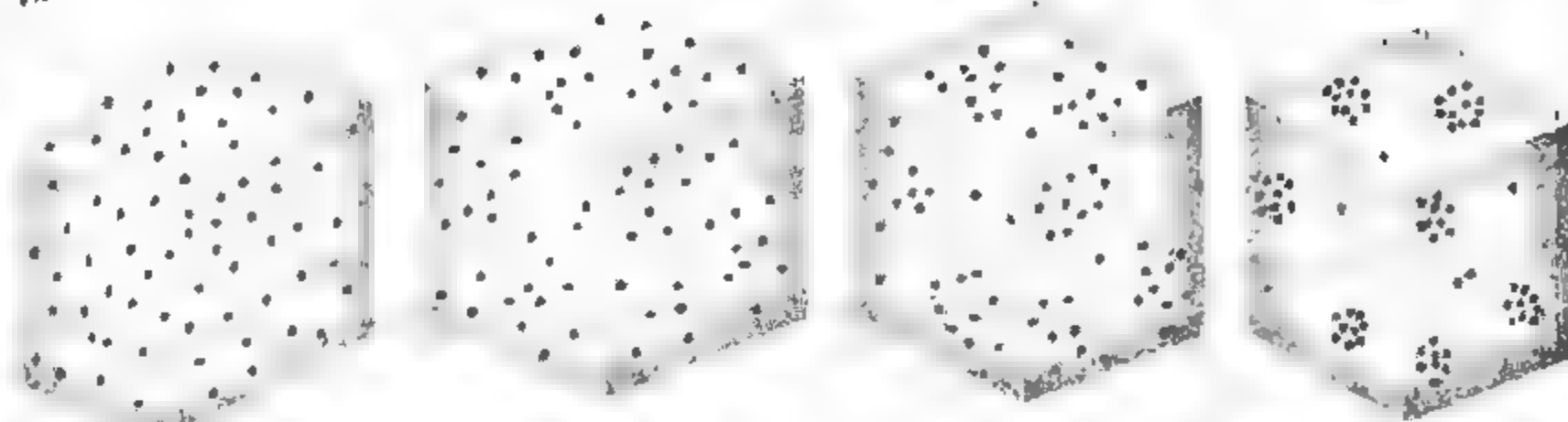


astronómica, se vuelven las tornas y pasa a ser la interacción dominante. En torno a ella gira la relatividad general, que dicta la estructura y evolución del universo. Una gran nube de hidrógeno gaseoso en el frío del espacio se comporta de manera muy distinta al gas de Boltzmann dentro de un recipiente. Las masas de las moléculas se atraen entre sí por acción de la gravedad, generando tensiones que, lejos de respetar la distribución uniforme, la rompen por los puntos donde el azar haya congregado menos moléculas (figura 4). Las irregularidades tienden a magnificarse. Una mayor concentración de masa ejerce una mayor atracción sobre la materia del entorno. La nube de hidrógeno se fragmenta en uno o más agregados que continúan contrayéndose. Así nacen las estrellas.

Si recuperamos ahora la instantánea del fondo cósmico de microondas, la gravedad modifica por completo su interpretación. Para no perder el hilo, vamos a adoptar una visión simplificada y considerar que el universo se compone de partículas elementales de dos clases: partículas de materia y partículas mediadoras. Las primeras pueden absorber y emitir las segundas. Este juego de absorción y emisión es el responsable de las interacciones. El electromagnetismo, por ejemplo, describe los fenómenos donde ciertas partículas de materia, como los electrones y quarks, intercambian fotones (mediadores electromagnéticos). En las desintegraciones nucleares, se intercambian mediadores de la interacción débil. Los núcleos se mantienen unidos gracias al intercambio de mediadores de la interacción fuerte. Desde la perspectiva de estas tres interacciones, electromagnética, débil y fuerte, el fondo cósmico de microondas ofrece el retrato de un sistema en equilibrio termodinámico. Todas las partículas se hallan distribuidas de modo asombrosamente regular a lo largo y ancho del plasma primigenio, a la misma temperatura y ocupando todo el espacio disponible. El sistema roza la máxima entropía, como nos temíamos al principio. A menos que se someta a una cuarta interacción.

La gravedad propende a formar apelmazamientos en el plasma primordial. Para ella, el universo, a un segundo del Big Bang, se halla en un estado de profundo desequilibrio y con la entropía

FIG. 4



Una distribución uniforme de partículas evoluciona formando agregados bajo la acción de la gravedad.

bajo mínimos. Frente a la profusión de agregados que podrían prosperar, la materia se ha dispuesto casi en el único estado uniforme, que los suprime todos. Se trata de un macroestado ciertamente singular. Destruir su homogeneidad conduciría a un sinnúmero de configuraciones más probables del espacio-tiempo. Si solo dependiera de la gravedad, el plasma colapsaría de inmediato en una constelación de aglomerados. Si, por contra, la gravedad no contara en absoluto, las probabilidades seguirían favoreciendo configuraciones donde las partículas ocupasen todo el espacio. Existe, por tanto, un conflicto entre la perspectiva de la entropía del resto de interacciones, que llamaremos «térmica», y la gravitatoria. Cada una parte de un extremo, una rozando el máximo y la otra, el mínimo. Un segundo después de la singularidad, con un espacio reducido y la temperatura por las nubes, las interacciones no gravitatorias predominan, las partículas se agitan rebotantes de energía y apenas son sensibles a los dictados de la gravedad. Una situación de equilibrio termodinámico implicaría que las variables macroscópicas del sistema, como la presión, la temperatura y el volumen, permanecerían constantes. No es el caso, ya que la expansión se encarga de alterar el *statu quo*. Al tiempo que el espacio se dilata, baja la densidad de energía y el universo se enfría. La gravedad gana peso en el pulso entre entropías. La térmica disminuye, a medida que se pierde la uniformidad en la distribución de las partículas, y la gravitatoria



aumenta, a costa de acentuar las irregularidades que afloran. El balance arroja un incremento neto de la entropía del universo; la gravitatoria crece más de lo que mengua la térmica.

En apariencia, al «recoger» las partículas elementales en el volumen limitado de las estrellas y agrupar estas últimas en galaxias y cúmulos de galaxias, hemos organizado la materia, en contra de la tendencia que marca la segunda ley de la termodinámica. Gracias a la gravedad, el aparente proceso de ordenamiento que acompaña la expansión esconde un progresivo aumento de entropía. Más importante aún, la gravedad precipita la dinámica estelar, que establece una cadena bien engrasada donde la entropía sigue creciendo. Cuando una nube de gas sideral —compuesta en su mayoría de hidrógeno— se contrae bajo la atracción gravitatoria, se vuelve cada vez más densa y caliente. Sucede con cualquier gas que se comprime, como el que se introduce a presión en la rueda de una bicicleta. A partir de una cierta temperatura, los núcleos de hidrógeno (protones) colisionan con suficiente ímpetu entre sí como para superar su repulsión eléctrica, lo que inicia una serie de reacciones nucleares. Básicamente, las estrellas radian energía mediante la fusión de cuatro núcleos de hidrógeno para producir un núcleo de helio. Para un contable termodinámico podría parecer que, puesto que se reduce el número de partículas, la entropía disminuye, pero el proceso libera energía, en forma de neutrinos, positrones y fotones. Los neutrinos suben poco la tasa de entropía. No interactúan apenas con la materia y escapan de inmediato. Los positrones se desintegran en cuanto chocan contra un electrón, produciendo más fotones. Ambos, neutrinos y positrones, surgen de la transformación de algunos protones en neutrones, necesarios para constituir los núcleos de helio.

Los fotones son muy sensibles a las partículas cargadas que componen la estrella y su avance se ve entorpecido constantemente por ellas. La fusión ocurre en el núcleo de la estrella. Allí el grado de aglomeración de la materia recuerda al que sufría la luz en el plasma primordial. A poco que avance un fotón, se da de bruces contra otro núcleo, que lo absorbe y emite en una dirección aleatoria. En lugar de progresar en línea recta, se pier-

de en el laberinto de un zigzagado interminable. Además, a través de esta incesante interacción con la materia, los fotones se descomponen en una miríada de fotones de menor energía. Se ha calculado que la mitad de la energía generada en la fusión del hidrógeno tarda en salir de la estrella decenas de miles de años. Lo único

que interesa al contable termodinámico es que por cada núcleo de helio se terminan produciendo millones de fotones. El número de partículas se multiplica, lo que ofrece muchas más posibilidades combinatorias y, en consecuencia, la entropía se dispara. En el recorrido entre el núcleo y la superficie de la estrella, la energía concentrada de la fusión se reparte en una plétora de partículas, que se absorben y emiten en direcciones aleatorias: se degrada. Aunque una conclusión apresurada hacía temer lo contrario, un universo lleno de estrellas lo que hace es distribuir por toda su extensión infinidad de máquinas termodinámicas, que se dedican a acrecentar la entropía. La contracción gravitatoria de una nube de gas funciona como un catalizador de reacciones nucleares, que elevan el número de partículas y las diseminan a los cuatro vientos.

De entre todos los fotones que escapan de la estrella, algunos pueden alcanzar un planeta como la Tierra e interactuar con él. En el proceso, muchos más fotones, menos energéticos, abandonarán el planeta y, de nuevo, aumentará el número de partículas y su grado de dispersión, degradándose más aún la energía. Esta crecida en el caudal de la entropía deja un amplio margen para procesos locales donde disminuya, como el desarrollo de seres vivos.

La entropía no roza su techo en las estrellas, donde la presión de las partículas —aventada por la fusión— logra mantener a raya la pulsión de la gravedad por comprimir al máximo la materia. No obstante, llega un momento en que el hidrógeno del núcleo se agota y el reactor nuclear renquea. Puede recurrir temporalmente a otras cadenas de fusión, y producir carbono a partir

El hecho de que este gas se haya distribuido de una forma notablemente uniforme a través del espacio es lo que nos ha dado la segunda ley [de la termodinámica].

ROGER PENROSE



del helio, por ejemplo, pero tarde o temprano la estrella, como tal, deja de ser sostenible. La magnitud del colapso que sobreviene depende de su masa. Puede acabar como una enana blanca, como una estrella de neutrones o convertirse en la trampa gravitatoria definitiva y contraerse hasta formar un agujero negro. Para un volumen dado, un agujero negro del mismo tamaño ofrece la configuración de materia y energía que puntúa más alto en el marcador entrópico. ¿Por qué? Recordemos que la entropía refleja el número de cambios que se pueden introducir en un sistema a nivel microscópico sin que se adviertan macroscópicamente. Nadie se puede asomar al interior de un agujero negro. De él tampoco escapan mensajeros —ni siquiera lo hace la luz— que vayan a revelar lo que oculta. El agujero negro se comporta como una cuenta opaca que no comunica sus transacciones, así que puede barajar sus microestados cuanto quiera y seguir presentando la misma cara macroscópica. ¿Qué otra coyuntura fomentaría una entropía mayor? Es cierto que, en realidad, el bloqueo no resulta tan efectivo. Stephen Hawking demostró que los agujeros negros emiten algo de radiación electromagnética, pero esas migajas de información apenas coartan una extraordinaria libertad de acción fuera del control de los observadores. Así, los agujeros negros llegan a atesorar cantidades exorbitadas de entropía. El que reside en el centro de nuestra galaxia acapara cien veces más entropía que todas las partículas que componen la sección observable del universo.

A lo largo de esta historia se han omitido cuidadosamente infinidad de lagunas en nuestro conocimiento acerca de la evolución del universo. No obstante, podemos mostrar una confianza razonable en que, aun ignorando muchas estrofas de la letra, la melodía de fondo expresa un *crescendo* de la entropía global desde un segundo después del Big Bang hasta la actualidad. La flecha del tiempo parece firmemente establecida a partir del primer registro histórico. ¿Y antes? La teoría clásica del Big Bang se encoge de hombros ante este interrogante. ¿Quién puede decir lo que sucede cuando toda la materia y energía del universo se congrega en un solo punto? Para retirar el velo del misterio, hace falta un juego de ecuaciones que no se rompa al abordar la sin-

gularidad. La cuestión que abre el capítulo sigue pues en el aire: ¿qué causó la insólita situación de orden inicial? Y ya puestos, ¿cómo se creó toda la materia del universo que se dispersa en la expansión?

## La prehistoria de la entropía

Al remontarnos más allá del fondo cósmico de microondas, nos encontramos con un puñado de preguntas trascendentes y sin pistas experimentales que nos guíen. Si se quiere continuar el camino, solo queda el recurso de extrapolar la física conocida a las condiciones extremas del origen del universo y forzar al máximo el músculo de la especulación. El recorrido debe sortear abismos quizá insondables. Por un lado, las evidencias apuntan a que en el universo abundan la materia y la energía en formatos exóticos que, hoy por hoy, desafían nuestra capacidad de análisis. Contamos con la esperanza de producirlas artificialmente en los laboratorios, en un futuro indeterminado, o de recabar suficiente información indirecta sobre ellas, a partir de observaciones astronómicas que permitan caracterizarlas. Por otro lado, la vanguardia de la física teórica se divide en dos facciones, una relativista y otra cuántica. En nuestra discusión sobre el progreso global de la entropía hicimos una distinción entre partículas de materia y partículas mediadoras, asignando a estas últimas el cometido de las interacciones. Sin embargo, dimos un tratamiento diferente a la gravedad, que en ningún caso hemos descrito en términos de partículas. Este trato discriminatorio obedece a que no disponemos de una interpretación cuántica de la gravedad.

A primera vista, la relatividad general y el modelo estándar —el feliz matrimonio entre la mecánica cuántica y la relatividad especial— se han repartido el universo y cada uno reina sin interferencias del otro en sus dominios, uno astronómico, el otro subatómico. A medida que el rebobinado de la expansión se aproxima a la singularidad, el espacio se contrae hasta dimensiones en las que ya no cabe despreciar los efectos cuánticos. Nos internamos así en territorio cuántico sin abandonar el relativista.



Como acabamos de señalar, no sabemos qué leyes cuánticas de la gravedad configuran este ámbito tan fuera de lo común.

Al hablar de las cosmologías de Friedmann y Lemaitre, comentamos con naturalidad que el espacio se expande. Sin embargo, ¿cómo funciona físicamente la expansión? En las ecuaciones de la relatividad general una frontera separa la geometría del espacio-tiempo de la distribución de materia y energía. La dilatación del espacio, en términos geométricos, no plantea problemas. Se puede entender como un cambio gradual de escala. Ahora bien, ¿cómo opera a nivel microscópico el proceso de creación de nuevo espacio vacío? Las ecuaciones de Einstein no contemplan su naturaleza cuántica. ¿En qué sentido deben interpretar las partículas elementales la sentencia de Wheeler: «el espacio le dice a la materia cómo debe moverse»? Desconocemos la estructura ultramicroscópica de la sábana-espacio. ¿Pierde su continuidad a distancias muy cortas? ¿Se compone de piezas cuánticas? Ignoramos la mecánica de su estiramiento cuando se examina con tanto detalle. Se trata de un fenómeno que, de momento, elude la exploración directa.

La ausencia de una teoría cuántica de la gravedad limita la comprensión de otros aspectos de la cosmología. Aunque antes hemos manejado con cierta alegría la expresión «entropía gravitatoria», queda lejos de estar bien definida. El cómputo de los microestados que se asignan a cada macroestado resulta sencillo con las partículas cuánticas de la interacción débil, fuerte y electromagnética. En el marco de la relatividad general no se puede aplicar la misma contabilidad. Hay físicos que sostienen que, mientras no se disponga de una teoría cuántica de la gravitación, no se sabrá aplicar con propiedad la mecánica estadística al cálculo de todos los microestados gravitatorios compatibles con un macroestado dado del espacio-tiempo. El problema de la contabilidad trasciende la gravitación. Existen suficientes incógnitas en torno a algunos de los ingredientes básicos del universo, como la materia o la energía oscuras, como para determinar con precisión su entropía. Por no hablar de cómo afecta al cómputo la presencia de dimensiones adicionales que postulan las teorías de cuerdas. Hasta que no se establezca la identidad de todas

las piezas del puzzle cósmico será imposible hacer un recuento definitivo de microestados, al menos en la región del universo observable. No hay que olvidar que, siempre que hablamos del universo, nos referimos a aquella porción accesible a nuestra experiencia.

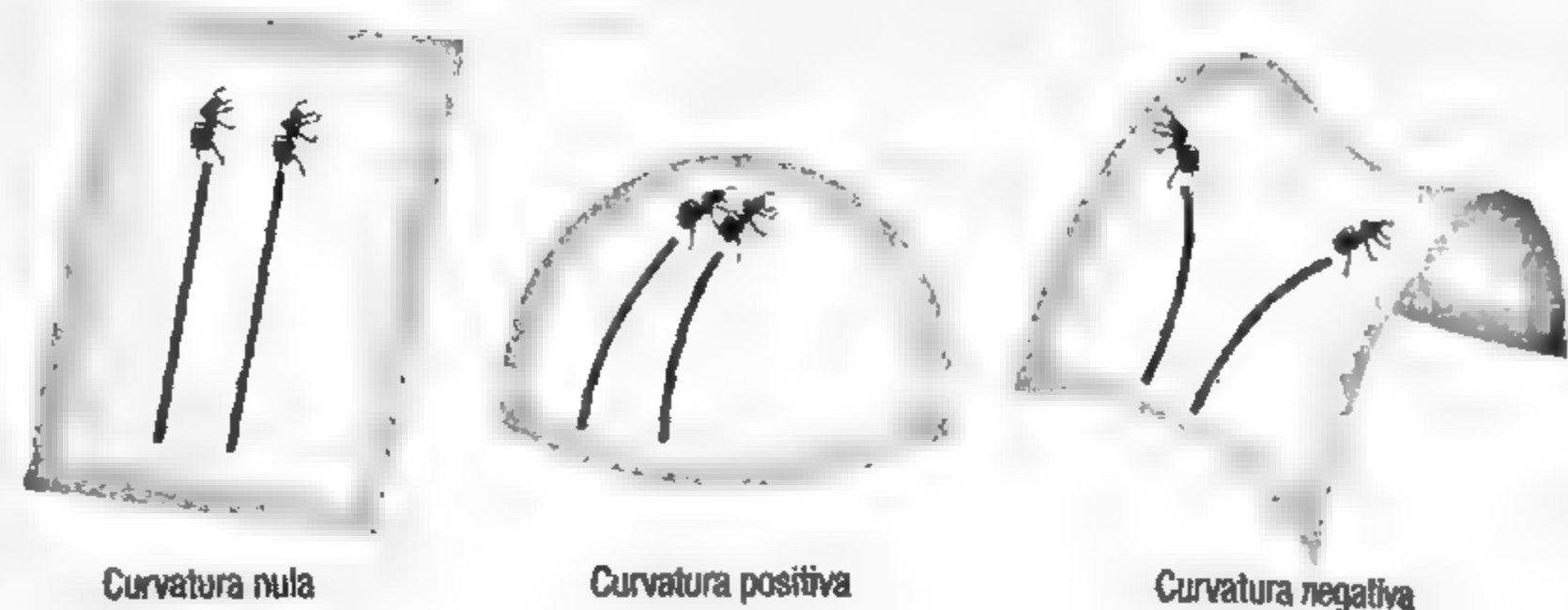
A falta de un marco conceptual que unifique la relatividad general y el modelo estándar, todavía se le puede sacar mucho partido a ambas teorías y atacar los problemas que afloran allí donde se solapan sus respectivos territorios, esquivando con maña las incompatibilidades. Se aplica entonces una mirada dividida, con un ojo hipermetrope (relativista) y otro miope (cuántico). La hipótesis de la inflación, que arroja luz sobre un episodio clave en la historia del universo previo a la instantánea del fondo cósmico de microondas, despliega con maestría esta clase de táctica.

Dos grandes interrogantes que no resuelve la versión ortodoxa del Big Bang son los llamados problemas de la planitud y del horizonte. El primero surge de la siguiente consideración. Las ecuaciones de la relatividad general establecen la forma de la sábana-espacio de cuatro dimensiones en función de su densidad de materia y energía. Al imponer las condiciones de isotropía y homogeneidad, el catálogo de posibles geometrías se reduce a tres: un espacio-tiempo con curvatura nula, con curvatura positiva o con curvatura negativa. En un universo de dos dimensiones, estas opciones se encarnarían en un plano, un cuenco y la zona central de una silla de montar (figura 5). Hablamos aquí del aspecto de la sábana-espacio en su conjunto, que promedia las curvaturas locales que puedan imprimir en ella cada estrella, cada nube de gas o cada frente de radiación. Si las tres superficies de la figura fuesen planchas metálicas, estos accidentes se reflejarían en su fisonomía mediante pequeñas abolladuras o depresiones. Semejantes irregularidades puntuales no nos interesan. Queremos saber en cuál de las tres categorías entra la plancha entera —el universo— o, al menos, la porción que observamos de él.

Imaginemos un universo tremendamente compacto, que alabea el espacio-tiempo con una curvatura positiva muy acentua-



FIG. 5



Representación de los tres tipos de curvatura en superficies de dos dimensiones.

da. Procedemos a extraerle poco a poco materia y energía, en la misma medida a lo largo de toda su extensión, con el propósito de ir rebajando la densidad. Advertimos entonces cómo la curvatura se va suavizando hasta anularse en un plano. Si continuamos la sangría de energía y materia, la curvatura cambiará de signo y se irá volviendo cada vez más negativa. Este experimento mental muestra que la planitud sirve de frontera entre las curvaturas positiva y negativa. Numerosas densidades confieren a la sábana-espacio una curvatura positiva, y otras tantas, una negativa. Una sola logra el difícil equilibrio de un espacio-tiempo plano. Recibe el nombre de «densidad crítica» y se obtiene al encerrar unos cinco átomos de hidrógeno dentro de un metro cúbico. Las probabilidades parecen jugar a favor de un universo más o menos curvo, con la curvatura del signo que sea. La expansión no hace sino reforzar esta expectativa, porque magnifica la más mínima desviación de la planitud. Cuando crece un volumen de espacio-tiempo, varía tanto su densidad de energía-materia como su densidad crítica. Solo si ambas coinciden evolucionan al mismo ritmo. Hay que acertar en la diana de la densidad crítica para preservar la planitud a medida que el universo se dilata.

Puestas las tres opciones encima de la mesa —una curvatura positiva, nula o negativa—, ¿cuál corresponde a la geometría de nuestro universo observable? Antes de despejar la incógnita, hay que determinar su densidad de materia y energía. No es tarea fácil, pero las mejores estimaciones, que incorporan datos del observatorio espacial Planck, apuntan a que el universo es plano con un margen de error que no supera el 0,05 %. Una coincidencia que, después de catorce mil millones de años de expansión, cabe calificar de portentosa. Hasta aquí, el problema de la planitud.

El problema del horizonte nos retrotrae al fondo cósmico de microondas. ¿Cómo se puso de acuerdo la materia del universo para desplegar un lienzo de uniformidad de tan colosales dimensiones? El equilibrio térmico dentro de un volumen dado precisa que cada región se mantenga en contacto con las demás. ¿Qué sucede cuando el espacio, al dilatarse, las separa? Se corre el riesgo de que se rompa la comunicación entre ellas y cada una evolucione de manera independiente. Las irregularidades en la distribución de energía se corrigen a base de interacciones. Estas implican el intercambio de partículas mediadoras, que no pueden superar la velocidad de la luz. Imaginemos un punto A situado en la superficie de la sábana-espacio. Su radio de influencia, en cualquier dirección, se extiende hasta una distancia igual al producto de la velocidad de la luz por el tiempo que lleve funcionando la expansión. Esa distancia en torno al punto delimita un círculo, un horizonte más allá del cual no puede hacer llegar sus partículas mediadoras. El área que encierra contiene todos los puntos con los que A ha podido intercambiar partículas para conjurar la homogeneidad. El problema reside en que el territorio que cartografía el fondo de microondas presenta regiones separadas por distancias noventa veces más largas que el radio de estos horizontes. ¿Cómo lograron pues interactuar para mantener la misma temperatura con un nivel de concordancia de una cienmilésima de grado?

En 1980, Alan Guth dio con una solución que mataba los dos pájaros de un tiro, tanto la planitud sobrenatural del universo como su inconcebible homogeneidad. De regalo, ofrecía un posible mecanismo para originar (casi) toda la masa del universo. En esencia, insertó un episodio de expansión brutal —la infla-



ción— muy poco después del Big Bang. Resuelve el problema de la planitud porque la inflación funciona como una plancha que alisa el espacio. Es fácil verlo mediante una analogía. Un guisante exhibe una redondez evidente, pero si en una mínima fracción de segundo adquiriese las dimensiones de la Tierra, su superficie nos parecería perfectamente llana. Se obtendría el mismo resultado partiendo de formas mucho más irregulares (figura 6). Una expansión breve e intensísima produce un efecto similar en el espacio-tiempo. Cualquiera que fuese su curvatura original, la región que alcanzamos a divisar ahora desde la Tierra sería una fracción mínima muy amplificada, que se nos antojaría plana.

La inflación también solventa el problema del horizonte, porque toma un volumen pequeño, en el que hasta los puntos más distantes pueden interactuar para alcanzar el equilibrio y lo somete a una brutal expansión, tan rápida que proyecta el equilibrio a un volumen infinitamente mayor —el que abarca el fondo de microondas—, antes de que dé tiempo a descomponerse. La capacidad aclaratoria de la propuesta de Guth resulta muy atractiva, pero ¿es físicamente viable? Hemos visto ya que las ecuaciones de la relatividad general promueven un espacio-tiempo dinámico, susceptible de expansión o contracción. Existen diversas variedades de inflación, pero una típica ejecuta un salto de escala de  $10^{30}$  (un uno seguido de treinta ceros) en  $10^{-35}$  s (0,00000000000000000000000000000001 segundos). Equivaldría a agrandar una proteína pequeña hasta el tamaño de la Vía Láctea. ¿Le estamos pidiendo demasiado a la plasticidad del espacio-tiempo? Para que las ecuaciones de la relatividad dispensen un estirón tan desmesurado y efímero (figura 7), hace falta recurrir a procedimientos extraordinarios.

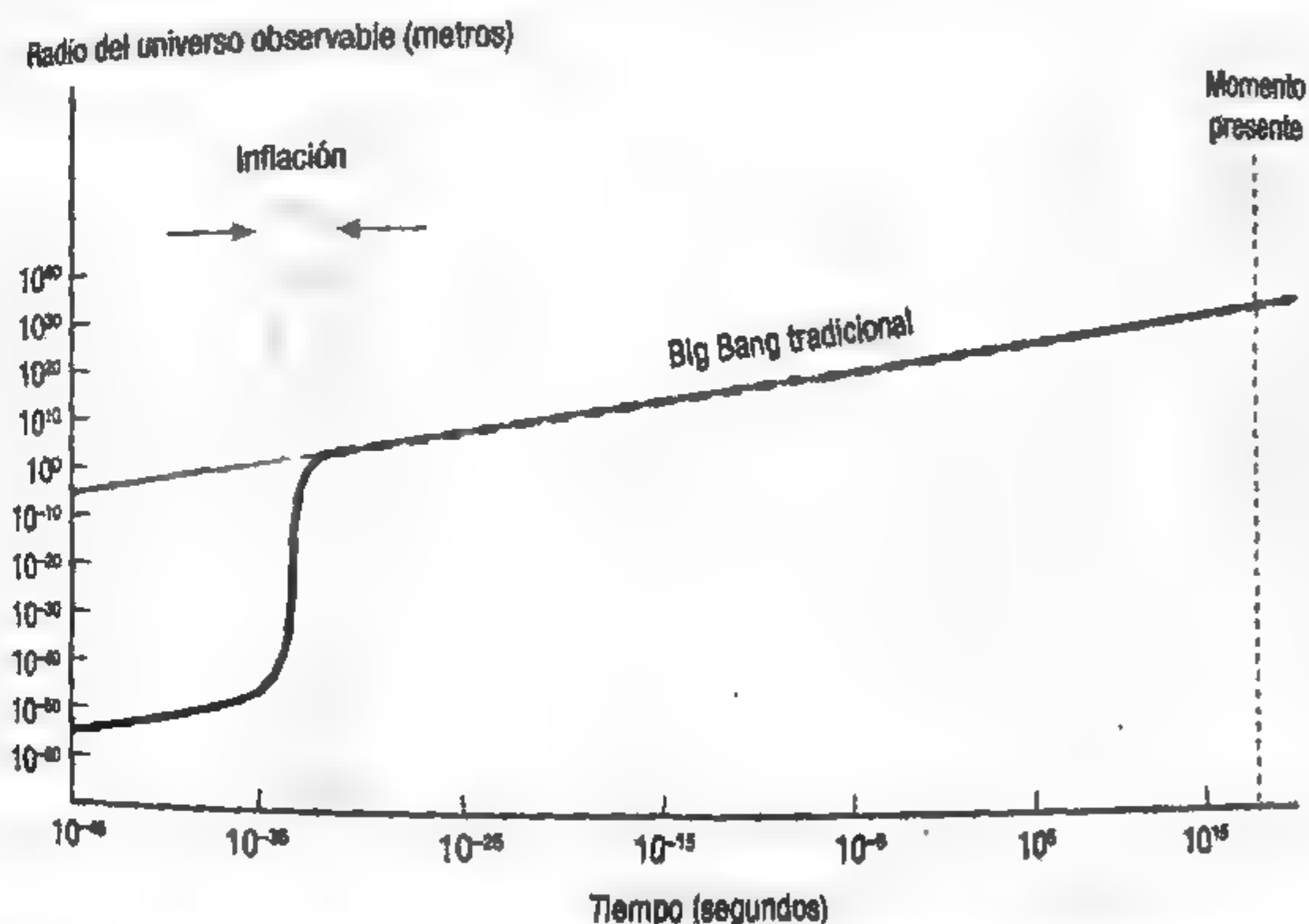
La gravitación de Einstein guarda en la manga un as con el que no contaba la atracción universal de Newton: la posibilidad de una gravedad repulsiva, capaz de dar de sí el espacio a un ritmo endiablado. En la relatividad general, la gravedad no procede solo de la masa —o de la energía, la otra cara de la moneda que forja la relación  $E=mc^2$ —. La presión también crea un campo gravitatorio. Un gas confinado dentro de una olla ejerce una atracción gravitatoria sobre las masas de su entorno, mayor

Fig. 6



En esta secuencia, el factor de ampliación en cada paso es cinco. Si se aplicara decenas de veces, una persona del tamaño del último rectángulo deduciría de sus observaciones que vive en un espacio plano.

Fig. 7



El salto inflacionario. La diagonal clara representa el crecimiento del radio del universo observable que predice el Big Bang tradicional. La curva sinuosa muestra la versión inflacionaria. El tramo discontinuo señala que, una vez finaliza la inflación, ambos modelos se funden.

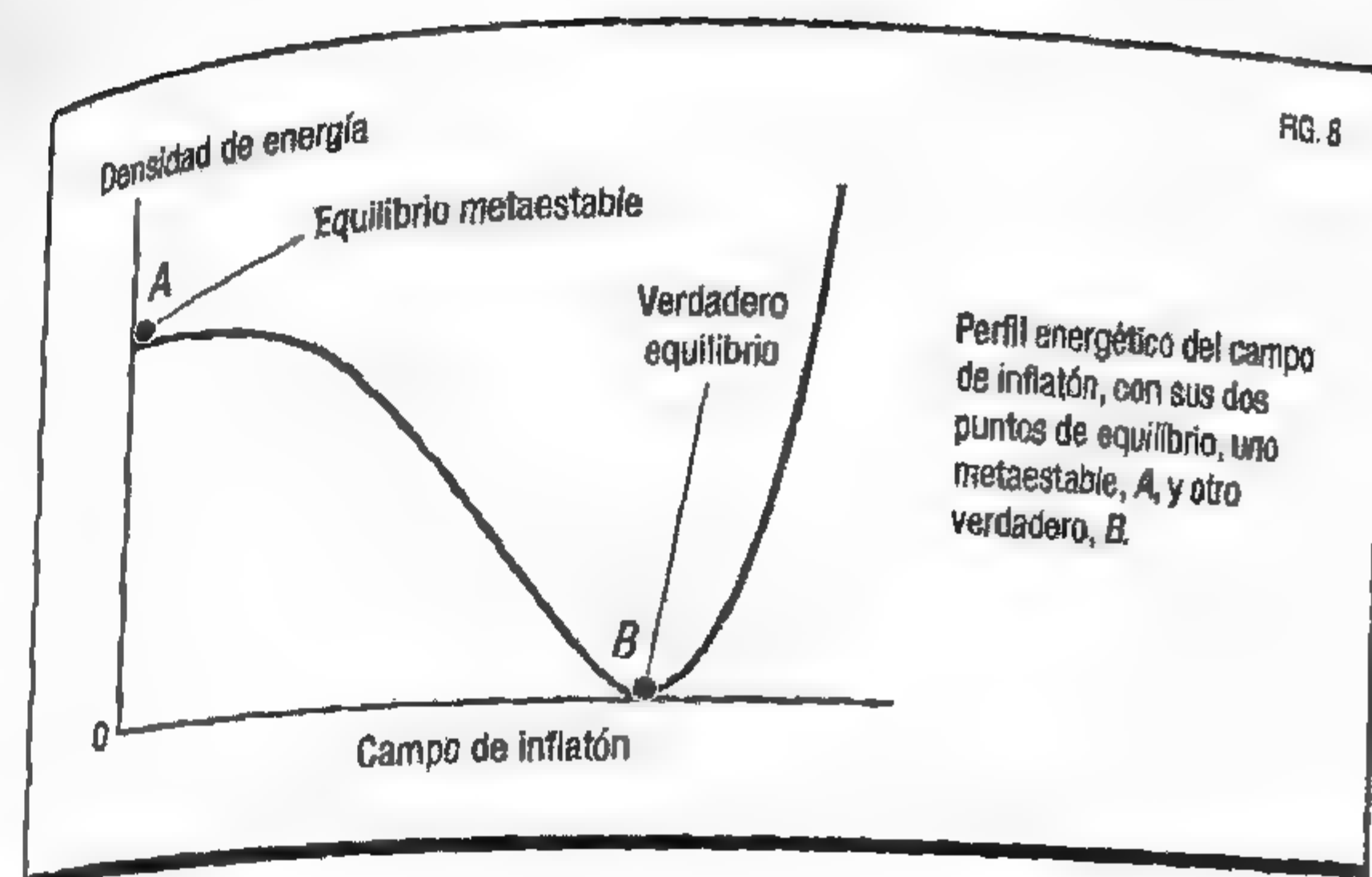
cuanto mayor sea su presión. ¿Por qué Newton no tuvo en cuenta este efecto? Porque su influencia en los fenómenos cotidianos pasa desapercibida. La contribución gravitatoria de la presión



del aire a temperatura ambiente es cien mil millones de veces más pequeña que la contribución de la masa de sus moléculas. Según las ecuaciones de la relatividad general, la presión de la materia común suscita una fuerza de atracción. Sin embargo, si uno juega con las ecuaciones e introduce en el apartado de la presión un número negativo, se encuentra con una gravedad repulsiva. Un valor suficientemente alto puede llegar a dominar la acción atractiva de la masa, la energía y la presión convencionales, disparando una expansión exponencial. Desde un punto de vista matemático no cabe objetar nada a este ejercicio, pero, físicamente, ¿de dónde se extrae la presión negativa? ¿Qué clase de configuración de materia o energía la ejerce?

Un aspecto fascinante de la inflación es que la relatividad general demanda desde su escala astronómica un mecanismo que cause un efecto físico extravagante y la mecánica cuántica, desde su escala microscópica, se lo proporciona. En el modelo estándar existe una criatura capaz de suministrar la presión negativa deseada. Los ladrillos formales de esta teoría son los campos cuánticos. Son funciones estadísticas que asocian a cada punto del espacio-tiempo la probabilidad de que se concentre en él una determinada cantidad de energía. Esta no puede adoptar cualquier valor, debe limitarse a los múltiplos de una cantidad fundamental. La fracción más pequeña observable constituye una partícula. Los campos presentan un estado singular, de vacío, que corresponde a su mínima actividad. Se trata de un punto estable, ya que los campos no pueden pasar a ningún estado de energía más baja. La mayoría de los campos de partículas materiales y mediadoras del modelo estándar, como los electrones, fotones o quarks, se ajustan a esta pauta.

Guth consideró otra clase de campo, con dos puntos singulares (figura 8). Uno, metaestable, ofrece un equilibrio provisional —el punto A de la curva— y no corresponde ni a su mínima actividad ni a su mínima energía. El campo puede permanecer en él durante un tiempo, pero en última instancia tendrá que abandonarlo y se desplazará hasta el punto de energía más baja, que brinda el fondo de la curva, B. A menudo se emplea la analogía de una canica. Si se apoya en la mayoría de los puntos de la cur-

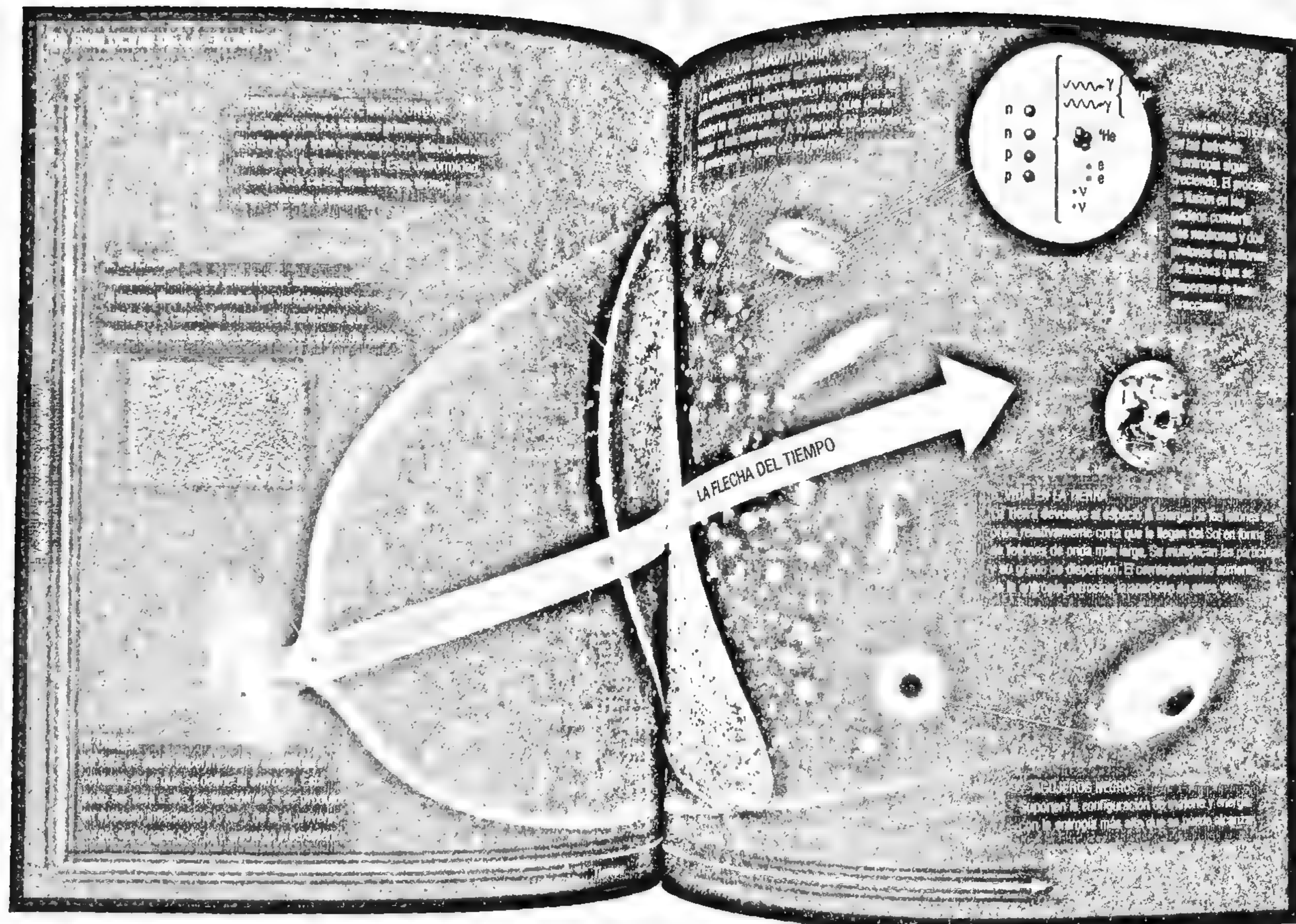


va del campo, no se sostendrá en ellos y rodará. Solo en A y en B queda en reposo. No obstante, en A disfruta de un equilibrio precario. Un temblor leve basta para desalojarla, mientras que B ofrece un asiento duradero, ya que cualquier perturbación se traduce en una sucesión de vaivenes que terminará por extinguirse y devolverla al mismo punto. Llamaremos al hipotético campo cuántico que sigue el perfil de la figura «campo de inflatón».

Mientras permanece en la posición de equilibrio metaestable A, el campo tiene a su disposición una cierta densidad de energía (la altura del montículo de la curva). El campo de inflatón se extiende a lo largo de todo el espacio-tiempo. Se puede comparar con un campo de temperaturas. Con la ayuda de un termómetro, podemos medir los grados en cualquier punto de una habitación. El conjunto de todas las medidas configura un campo. El campo de inflatón asigna, en lugar de un número o una medida, una función que refleja la probabilidad de que en ese punto del espacio-tiempo se concentre en el campo una energía dada. En cada punto y momento del universo, el campo se halla en uno de los estados que se representan en la curva (figura 9).

¿Qué ganamos al diseñar esta artificiosa entidad físico-matemática? La densidad de la materia ordinaria disminuye cuando se aumenta el volumen. Algo muy distinto acontece con el campo de inflatón. Durante la expansión se dilatan sus dominios,

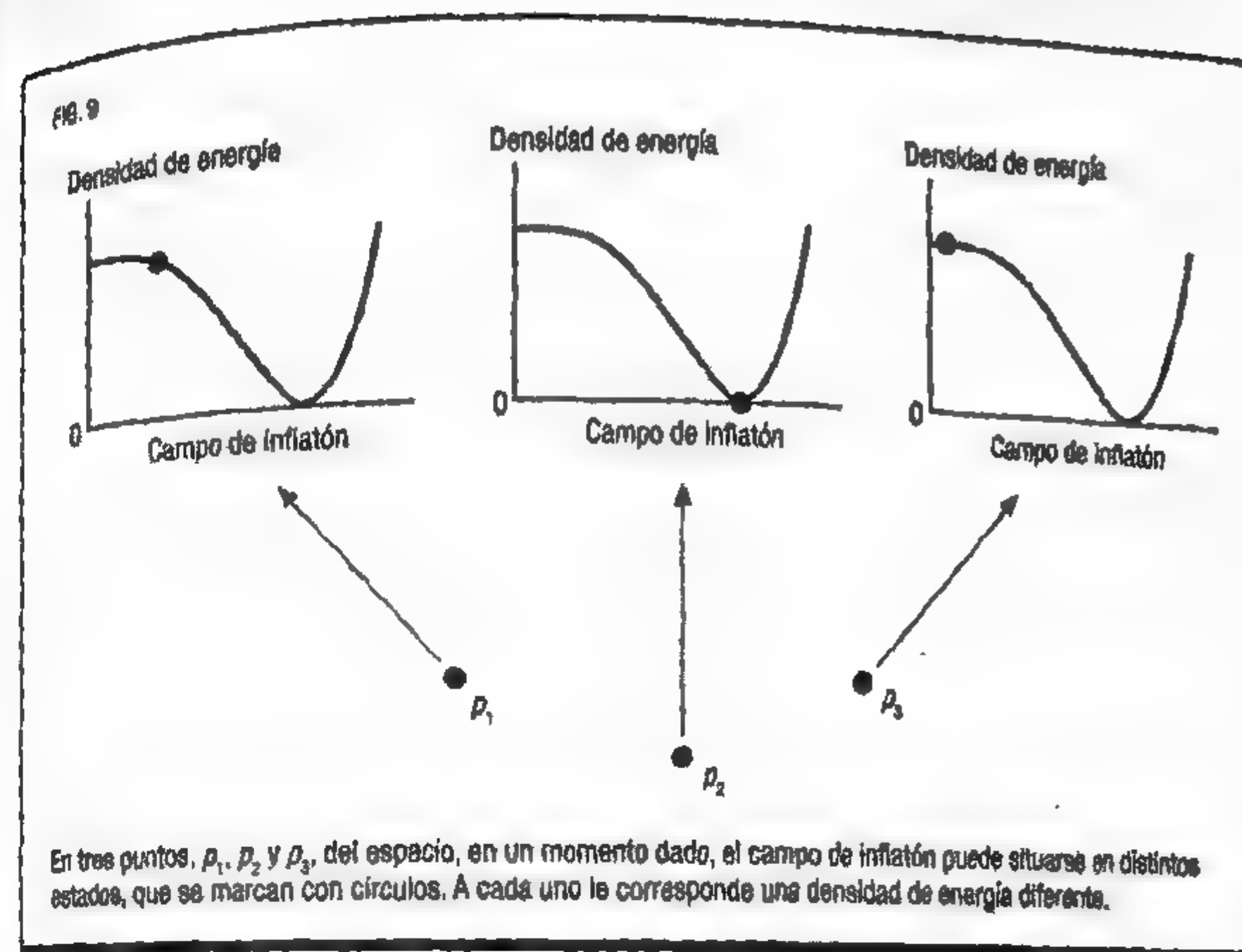






ya que los campos se definen para cada punto del espacio. Si en todos ellos se mantiene en su estado metaestable, surgirán más puntos donde almacene provisionalmente energía (la que corresponde a la altura del montículo). La densidad de energía permanecerá constante a pesar de que se esté incrementando el volumen. Este extraño comportamiento se traduce en una presión negativa.

Una diminuta región en la que el campo de inflatón se instale en su estado metaestable puede, en virtud de su presión negativa, prender la mecha de una expansión acelerada. Si en el nuevo espacio que se va creando conserva su estado metaestable, sus reservas energéticas se incrementarán. Es como si cada punto del espacio ahorrara energía y la expansión incorporara nuevos ahorradores. Su anexión extenderá la zona de presión negativa, que a su vez impulsará más todavía la expansión. ¿Quién satisface las exorbitadas demandas energéticas de un campo de inflatón desencadenado, que además crecen exponencialmente? El proceso parece quebrantar de modo flagrante el primer principio de la termodinámica. No lo hace porque la expansión no solo amplía los dominios del campo de inflatón, también acrecienta los del campo gravitatorio y este exhibe una segunda propiedad providencial. La creación de nuevo campo gravitatorio libera energía. Se trata de un rasgo que también exhibe la gravedad clásica de Newton. En resumidas cuentas, el campo de inflatón, dada su peculiar naturaleza, puede generar presión negativa si se sitúa en su estado metaestable. Esta presión negativa inaugura una violentísima expansión, que ensancha los dominios de los campos gravitatorio y de inflatón. El primero desprende energía, que el segundo se ocupa de almacenar. El proceso se realimenta a un ritmo vertiginoso, duplicando una y otra vez el tamaño del universo, hasta un centenar de veces. El campo de inflatón puede mantenerse en equilibrio metaestable durante un tiempo, pero cualquier ligera perturbación lo hará rodar por la pendiente hacia el verdadero equilibrio, en el fondo de la curva. Cuando se desliza cuesta abajo, suavemente, libera toda la energía que venía acumulando. Es lo que termina ocurriendo unos  $10^{-35}$  s después de que se inicie la ráfaga expansiva.



¿Adónde va a parar la energía que ha atesorado el campo de inflatón en tan cortísimo tiempo? Al resto de campos cuánticos con los que se comunica: campos de quarks, de electrones, de fotones, de neutrinos... En estos, la descarga de energía se manifiesta en forma de un auténtico aluvión de partículas. El universo se llena súbitamente de materia uniformemente distribuida, a tiempo de salir retratada en el fondo cósmico de microondas.

¿Cuáles son las implicaciones para la flecha del tiempo del estallido inflacionario? Cuando termina, la entropía gravitatoria anda por los suelos, ya que se enfrenta a un panorama de inusitada regularidad. Sin embargo, la conversión de la energía que almacenaba el campo de inflatón en las partículas que inundan el espacio-tiempo dispara el contador entrópico. Se estima que pudieron crearse hasta unas  $10^{80}$  partículas, entre mediadoras y materiales. Semejante incremento en el número de piezas del universo aumenta de manera extraordinaria el repertorio de posibles configuraciones. En consonancia, también lo hace la



## PRESTIDIGITACIÓN DE LOS CAMPOS

Ahondemos en dos puntos clave del argumento de la inflación, que se apoyan en el carácter singular de sus campos protagonistas: la presión negativa del inflatón y la liberación de energía que supone la creación de campo gravitatorio. El primer argumento adapta una analogía de Alan Guth.

### La presión negativa

La figura 1 muestra una jeringuilla llena de aire. Si se tapa la punta y se tira del émbolo, se establece en su interior un vacío relativo. La densidad de la materia ordinaria, como la del aire atrapado dentro del tubo, disminuye cuando se incrementa el volumen. Al concentrarse menos moléculas por centímetro cúbico, menos moléculas golpearán también el émbolo desde la izquierda. La densidad del aire fuera de la jeringuilla permanece constante, así que se mantiene el número de impactos desde la derecha. La diferencia de presiones da lugar a una fuerza neta hacia la izquierda. Para desplazar el émbolo hacia la derecha, la mano debe vencer esta fuerza y, en el empeño, consume energía. La presión ordinaria, positiva, comunica energía con sus impactos y se dirige siempre hacia fuera, empuja. La mano no acusa un empuje del émbolo, sino lo contrario, una succión, que se dirige hacia dentro de la jeringuilla y que se podría interpretar como una presión negativa. Esta no obedece a la naturaleza peculiar de la materia encerrada en la jeringuilla —que es el mismo aire del exterior—, sino a una diferencia de presiones. En el caso de que el tubo solo contenga campo de inflatón en su estado metaestable, la situación cambia. Supongamos que, al tirar del émbolo, el campo amplía sus dominios dentro de la jeringuilla, en el mismo estado. Su densidad de energía no cambia, sigue siendo la que marca la altura del montículo de las dos curvas de la figura 2. Puesto que la densidad de energía no disminuye y se incrementa el volumen, debe aumentar la cantidad de energía en el interior del tubo. ¿De dónde la extrae el campo? Solo se la puede ceder la mano que desplaza el émbolo. Dado que gasta energía al tirar, está venciendo una resistencia. En este caso la succión obedece a una presión negativa que no surge de una diferencia de presiones, sino de las propiedades del campo de inflatón en su estado metaestable.

### La liberación de energía gravitatoria

Imaginemos una pequeña roca perdida en mitad del vacío interestelar. Se encuentra tan alejada de cualquier cuerpo que cabe suponer que no siente ningún campo gravitatorio en su entorno. Sin energía cinética ni gravitatoria —se halla en reposo y apartada del resto de masas— su energía total es cero. Pasado un tiempo, un planeta errante se aproxima lo suficiente para hacer notar su presencia. Podemos interpretar que comienza a originarse campo gravitatorio en el entorno de la roca. Esta, al sentir la atracción del planeta, se pone en marcha. ¿De dónde procede la inesperada energía de su movimiento? El campo gravitatorio del planeta abre bajo sus pies un pozo de energía negativa. A medida que se hunde en él, la roca, para conservar su energía nula, gana energía cinética positiva. Ya en la física newtoniana, la energía que se acumula en un campo gravitatorio es siempre negativa, de manera que, en un contexto en el que se conserva la energía, la generación de un campo gravitatorio debe venir acompañada

siempre de una liberación de energía. Edward Tryon extendió este equilibrio al universo entero, al proponer que toda la energía que exige su creación podría compensarse con la energía negativa de un pozo gravitatorio tan profundo como se quiera. El balance final arrojaría un gasto energético nulo para el proceso. Por tanto, el principio de conservación de la energía no plantea ninguna objeción a que el universo surja de la nada.

La diferencia de las presiones positivas  $P_1$  y  $P_2$  (ambas empujan hacia fuera) se puede interpretar como una presión negativa  $-P$  que funciona como una succión y que se opone a la fuerza  $F$  que ejerce la mano que tira del émbolo.

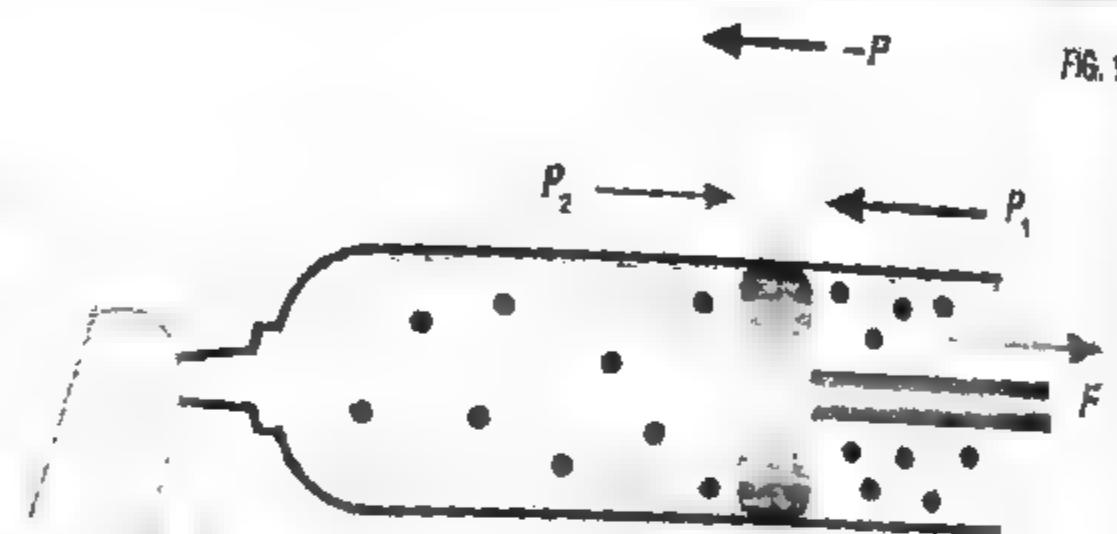
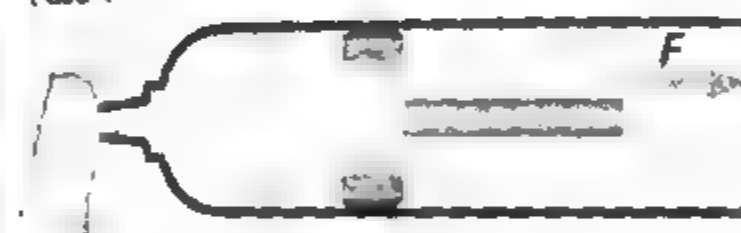


FIG. 1

Paso 1



Paso 2

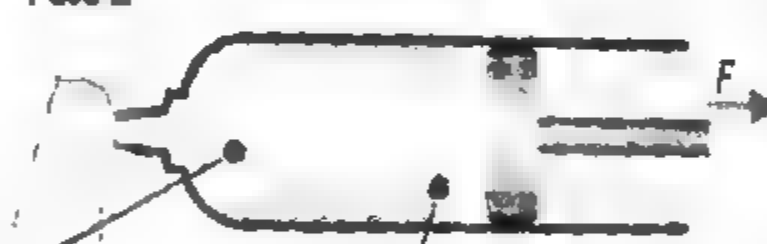
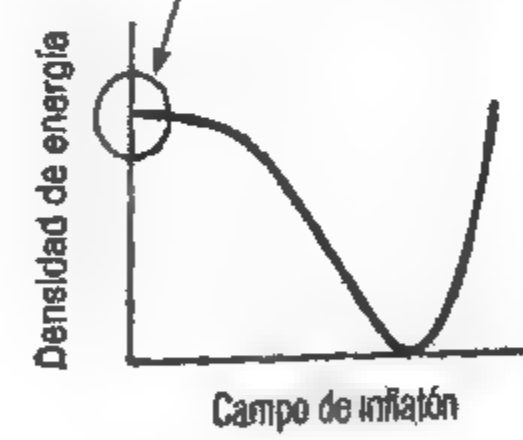


FIG. 2



Campo de inflatón



Campo de inflatón

Del paso 1 al 2 se incrementa el volumen, pero la densidad de energía en cualquier punto del interior de la jeringuilla sigue siendo la misma: la que corresponde al estado metaestable del campo. Como la energía total es igual al producto de la densidad por el volumen, el aumento del volumen se traduce en un aumento de energía dentro de la jeringuilla. Esta se extrae de la mano que tira del émbolo, que debe vencer una fuerza que resiste su esfuerzo, una presión hacia dentro, negativa por tanto ( $-P$ ).

entropía, compensando cualquier descenso que sufra la entropía gravitatoria. El saldo es, con creces, positivo. Al extinguirse, la inflación deja preparado el escenario para que la gravedad pueda comenzar su trabajo de aglutinamiento, fabricando estrellas, y fomentando la producción masiva de más partículas en direcciones aleatorias, gracias a los procesos nucleares. En suma, para que siga aumentando la entropía.

La inflación no responde a la pregunta final. ¿Cómo se originó el universo? ¿De dónde proceden sus ingredientes fundamentales, la densidad de materia y energía, el espacio-tiempo o los campos cuánticos que lo habitan? Con todo, suministra un mecanismo para impulsar la expansión que no parte de una singularidad. Además, exige una cantidad de materia mucho menor que el Big Bang tradicional, que embute en un solo punto toda la masa y energía del universo. La inflación solo requiere 10 kg para arrancar. Bastaría con que, por puro azar, en una región mínima —de unos  $10^{-26}$  cm de diámetro—, el campo de inflatón alcanzara su situación metaestable para desatar una hiperexpansión que desembocaría en el mundo que conocemos. El universo microscópico de 10 kg parece ofrecer un catálogo de estados posibles mucho más reducido que el que observamos ahora, así que quizá no habría que esperar demasiado a que, fortuitamente, se cantara el bingo de las condiciones de la inflación. Da igual que esta porción de materia tan modesta —que a veces se denomina «semilla»— no se hallara en un estado de mínima entropía o que la energía se distribuyera en ella caóticamente. El orden inicial deja de importar. La inflación alisaría cualquier irregularidad y derramaría encima una catarrata uniforme de partículas elementales, entregando el testigo a la gravedad para que continuase incrementando la entropía. La inflación sería como la ficha de dominó que hace caer a las demás, poniendo en marcha una cadena imparable en la que la entropía ya no haría sino crecer, grabando a fuego la flecha del tiempo hasta nuestros días.

Algunos físicos señalan que esta clase de razonamiento peca de ingenuo. Aunque las espectaculares hazañas de la gravedad lo enmascaren, el sistema encerrado en una esfera de  $10^{-26}$  cm es el

mismo que el universo actual, simplemente ha evolucionado. El número de microestados ni aumenta ni disminuye a lo largo de la expansión. Por diferentes que nos parezcan la semilla y el universo observable son dos configuraciones distintas del mismo sistema, como las moléculas de gas concentradas en una esquina o dispersas por todo el recipiente. Bajo esta luz, la configuración que propicia la inflación resulta altamente improbable, igual que un estado ordenado de muy baja entropía. El debate permanece abierto. La falta de un marco teórico completo y coherente impide establecer si a lo largo de la historia del universo que hemos ido esbozando el número de microestados de verdad se conserva. La carencia de datos experimentales y de una teoría cuántica de la gravitación convierte este campo en un hervidero de especulaciones tan ambiguo como estimulante. Hay teorías que permiten la formación de la semilla a partir del vacío, mediante un acto de prestidigitación cuántica, y otras que proponen multiversos, donde las ráfagas inflacionarias se suceden, haciendo brotar universos enteros, como fractales, cada uno regido por sus propias leyes físicas.

Conviene advertir que, aunque la inflación goza de aceptación muy amplia, no es unánime. El campo cuántico de Guth aporta la presión negativa necesaria para una expansión acelerada que resuelve muchos rompecabezas de modo impecable, como el de la planitud o el del horizonte, pero eso no demuestra su existencia ni que la inflación sea la única solución viable. Nadie ha detectado las partículas del campo de inflatón, aunque algunos creen reconocer en él al campo de Higgs. Otros muchos desmienten con rotundidad esta identidad. A fin de cuentas, en lo que nos incumbe a nosotros, la cosmología moderna es capaz de hilar relatos verosímiles donde la entropía aumenta teñidamente, mientras se conjura el espectro de los falsos recuerdos. La cuestión del origen sigue sumida en la penumbra y su eventual resolución podría echar por tierra muchos supuestos.

Para responder a la pregunta de por qué ocurrió, hago la modesta propuesta de que el universo, sencillamente, es una de esas cosas que ocurren de vez en cuando.

EDWARD P. TRYON, PRECURSOR DE LA IDEA DE UN UNIVERSO QUE PUDO SURGIR DE UNA FLUCTUACIÓN DEL VACÍO



Cualquier opción que cumpla los mismos requisitos explicaría la flecha del tiempo.

¿O no? La mayoría de los científicos apuesta por una solución cosmológica, en la vertiente que sea, pero tampoco escasean los escépticos. ¿Existen vías alternativas para hacer frente a la paradoja de la asimetría del tiempo que soslayan el incierto pasado del universo?

## CAPÍTULO 4

# Tiempo cuántico, tiempo relativo

La flecha del tiempo parece razonablemente asentada en un contexto clásico. ¿De qué modo le afectan las interpretaciones físicas del mundo más sofisticadas? ¿Cómo es el tiempo cuántico y relativista?

La expansión nos habla de un cosmos que evoluciona. Un universo con una historia que se desdibuja cuando nos remontamos a su mismo origen, pero que deviene en un tenaz aumento de la entropía desde muy poco después de su nacimiento hasta el presente. Resulta legítimo interrogarse sobre qué sucedió antes y traspasar el umbral a partir del cual nos abandonan las guías experimentales, pero la uniformidad que documenta el fondo cósmico de microondas basta para dar cuerda a la segunda ley de la termodinámica. En ese sentido, que jamás observemos cómo los añicos de cristal esparcidos por el suelo vuelan hasta recomponer una ventana o cómo el humo negro se desprende del aire para producir la madera de un leño obedece a la simetría de las condiciones iniciales, se llegue a dilucidar algún día su razón de ser o nos desafíe por siempre como un misterio insondable. Aun ignorando el mecanismo exacto que la forjó, el vuelo de la flecha del tiempo parece durar ya casi catorce mil millones de años.

Con todo, antes de darnos por satisfechos, conviene adoptar una cierta cautela. La justificación cosmológica, ¿ha podido embaucarnos con un aparatoso espejismo? ¿Y si la flecha está grabada a fuego en las mismas leyes físicas y no en las condiciones



iniciales? La uniformidad primigenia, que rompió la acción de la gravedad, podría constituir entonces un mero accidente, una pista falsa que nos ha desviado del buen camino. A lo largo de los tres primeros capítulos nos atuvimos a una visión ingenua, clásica, de la realidad. Ha llegado el momento de comprobar si bajo ese supuesto anudamos una red demasiado holgada por la que se nos escaparon los peces de una solución más sutil. El tiempo de la relatividad especial, sin ir más lejos, presenta diferencias notables con el de Newton. Tampoco hemos tenido en cuenta la otra gran revolución conceptual de la física, la mecánica cuántica, en cuyos cimientos anida una profunda asimetría. Además, ambas teorías, relatividad especial y mecánica cuántica, se alían en la doctrina física más ambiciosa a la hora de describir el mundo subatómico, el modelo estándar. En él, la simetría temporal no siempre se respeta. ¿Puede la irreversibilidad de las leyes fundamentales terminar explicando la irreversibilidad macroscópica?

## EL TIEMPO COMO ILUSIÓN

La relatividad especial vino a desbaratar cualquier interpretación intuitiva del tiempo. Se puede alegar que el tiempo o el espacio en la física de Newton tampoco son tan inofensivos como aparentan, pero la relatividad desconcierta incluso a primera vista.

En las ecuaciones de la física aparecen variables, como la velocidad o la posición, cuyo valor depende de dónde se sitúe el observador y cuál sea su estado de movimiento en el instante de medirlas. El término técnico que se aplica a un observador ideal, al que se atribuye una objetividad intachable, es «sistema de referencia». Se le añade el adjetivo «inercial» si además se desplaza con velocidad constante (incluso con velocidad nula, es decir, si se queda quieto). La distancia a un satélite, al centro de una plaza o a la cumbre de una montaña depende del lugar desde donde se mida y de si la operación se efectúa en reposo o en movimiento. ¿Existe algún punto de vista mejor que los demás, un sistema de referencia privilegiado que sirva para vali-

dar o corregir las medidas realizadas por otros observadores? El principio de relatividad presupone que no. Galileo estableció el primero de estos principios en el siglo XVII. Vino a decir que si un observador se encierra en un espacio que no le proporcione ninguna vista del exterior, no tiene modo de saber si está quieto o lo trasladan con velocidad constante. Con el fin de ilustrar su hipótesis, propuso el siguiente experimento. Un individuo se acomoda bajo la cubierta de un barco y estudia, sucesivamente, el vuelo de diversos insectos, el goteo del agua que cae en una botella de cuello estrecho, las maniobras de varios peces en una artesa con agua o la trayectoria de un objeto que le arroja un amigo. La velocidad de la nave no afecta a ninguno de estos fenómenos y, por tanto, por mucho cuidado que se ponga en examinarlos, no ofrecen el menor indicio sobre el estado de movimiento del experimentador. La incertidumbre desaparece en cuanto un golpe de viento frena o acelera el barco. Entonces los efectos se hacen notar: las gotas salpican fuera de la botella, la masa de agua en la artesa se estremece y los pasajeros se ven proyectados hacia delante o hacia atrás.

El principio de relatividad extiende un certificado: si un observador se desplaza con velocidad constante —no advierte ninguna aceleración— su punto de vista será tan bueno como el de cualquier otro observador inercial. Ningún criterio sanciona quién está quieto y quién se mueve. Esta afirmación resulta un poco chocante porque, en la práctica, no viajamos a bordo de ningún sistema inercial puro. La Tierra, desde luego, gira alrededor del Sol y, por tanto, vive en constante aceleración. El Sol tampoco presenta una velocidad constante, ni la Vía Láctea, ni el grupo local de galaxias al que pertenece. La relatividad permite manejar las mismas ecuaciones físicas a todos los observadores inerciales. No tienen por qué molestarse en sumar o restar términos que incorporen el efecto de las aceleraciones. Además, pueden deducir con facilidad cómo ve el mundo el resto de observadores inerciales —qué medidas obtienen— a partir de sus propias impresiones, siempre que conozcan sus velocidades. Para ello emplean un traductor matemático, un conjunto de ecuaciones que los físicos denominan *transformación de coordenadas*.

Sin negar que todos los sistemas inerciales utilicen las mismas ecuaciones ni cuestionar la incapacidad del investigador prisionero de Galileo para decidir, a través de sus experimentos, si se mueve o está quieto, Newton sí asumió la existencia de un sistema de referencia privilegiado, dictado por el engañoso sentido común. Aun en el supuesto de que alguien logre montarse a bordo de un vehículo inercial perfecto, el universo, a su alrededor, le brindará una referencia incontestable, un escenario en reposo capaz de resolver cualquier duda acerca de si se está trasladando o no.

En el siglo XIX, una fenomenología hasta entonces inconexa y desarticulada, el electromagnetismo, se esclareció en virtud de un marco teórico tan poderoso y sólido como el de la mecánica de Newton. Así, el acervo de la física se enriqueció con la incorporación de un nuevo juego de ecuaciones: las ecuaciones de Maxwell. Su estructura original ponía en evidencia que pertenecían a una especie diferente que las de Newton, lo que deparó no pocas sorpresas. De entrada, al aplicar el traductor matemático para saltar de un observador inercial a otro, las ecuaciones de Maxwell cambiaban de forma. Todo parecía apuntar a dos explicaciones: o bien los fenómenos electromagnéticos eran más sensibles y detectaban, no solo la aceleración, sino también una velocidad constante, o bien algo marchaba mal en las ecuaciones. La primera opción confirmaría la existencia del sistema de referencia absoluto que había postulado Newton. Si encerrado en un vehículo sin escotillas ni ventanas, un físico realizaba diversos experimentos con imanes y circuitos eléctricos y, basándose en los resultados, averiguaba a qué velocidad se estaba moviendo, esta tendría que establecerse respecto a un punto de referencia externo. Que debería coincidir con el que sirviese para determinar la velocidad de cualquier investigador que hiciera experimentos semejantes a bordo de otros medios de transporte. Además, las ecuaciones de Maxwell escondían entre sus términos una receta para calcular con qué rapidez se propagan las perturbaciones (ondas) electromagnéticas: la velocidad de la luz. Como las ecuaciones no llevan ninguna etiqueta que indique en qué sistema de referencia deben usarse, cabe concluir que en cualquiera

Después de seguir la misma receta, todos los viajeros inerciales del universo, ya sean raudos o lentos, deducirán que las ondas electromagnéticas se desplazan a la misma velocidad. Una conclusión absurda, ya que entonces se daba por sentado que el movimiento de un vehículo siempre tenía que sumarse al que desarrollasen por su cuenta los pasajeros, fueran moscas, peces o gotas de agua. Dos personas, una a bordo de un barco y otra en la orilla, que contemplan a un perro que corre sobre la cubierta, ven cómo su posición varía a distintas velocidades. ¿Por qué no iba a suceder lo mismo con las ondas electromagnéticas? La confianza en la autoridad newtoniana inclinaba la balanza en contra de las recién llegadas ecuaciones de Maxwell. Así y todo, los experimentos se mostraron inflexibles. Las leyes del electromagnetismo superaron todas las pruebas y no sirvieron para identificar ningún sistema de referencia absoluto.

Varios físicos y matemáticos veteranos —sobre todo el neerlandés Hendrik Antoon Lorentz y el francés Henri Poincaré— estuvieron a punto de encajar en su sitio todas las piezas del rompecabezas, pero un joven y desconocido Albert Einstein se les adelantó en 1905. Einstein supo separar con clarividencia el grano de la paja y, en aquella coyuntura, el grano se reducía al principio de relatividad y a la constancia de la velocidad de la luz para todos los observadores inerciales. Su combinación equivalía, conceptualmente hablando, a juntar fuego con dinamita. Einstein se atrevió a tomarlos como guías y a seguirlos hasta donde le llevaran, por lejos que fuera. Comprobó que, a lo largo del camino, se venían abajo todas las nociones intuitivas acerca del espacio y el tiempo. No obstante, el resultado exhibía una desafiante consistencia lógica. ¿Había que juzgarlo como un mero ejercicio de virtuosismo intelectual? La nueva relatividad, que se llamaría «especial», predecía fenómenos abracadabrantes, ajenos por completo a la física de Newton, contracciones del espacio y dilataciones del tiempo, que permitían resolver en el terreno experimental la pugna entre las dos teorías. En el curso de las décadas siguientes, las quimeras relativistas fueron tomando cuerpo en los laboratorios. Se trataba de efectos sutiles, por supuesto, que requerían medidas de una precisión inalcanzable en

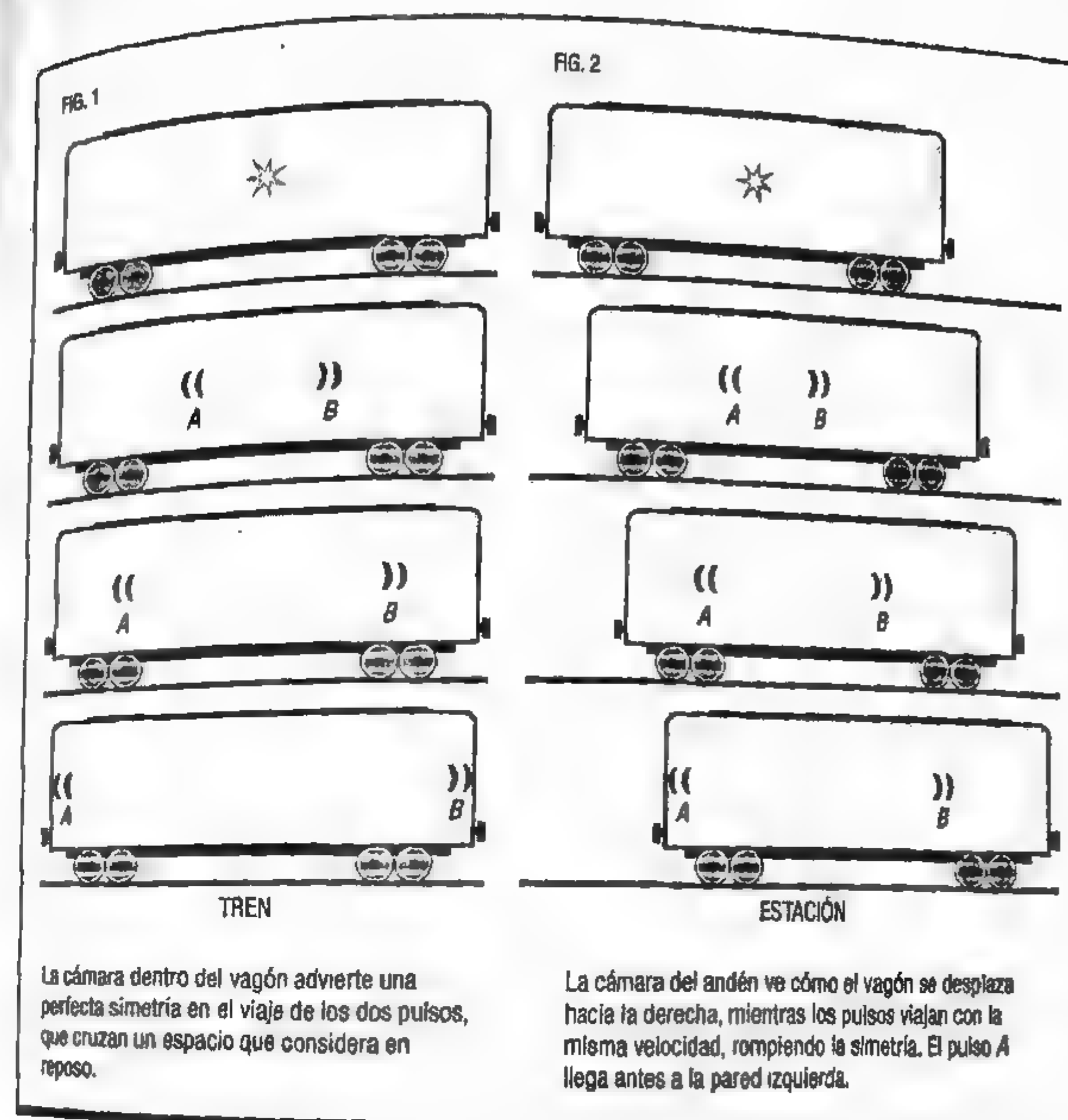


el siglo XVIII. Cuando llegó, el veredicto experimental fue inapelable: para desenvolverse en un rango de velocidades próximo a la luz, había que corregir las ecuaciones tradicionales. Las leyes de Newton conocieron así la primera enmienda en doscientos años.

Uno de los pilares, tanto de la física clásica como del sentido común, que se desmoronó en 1905 fue la noción de simultaneidad. Todos los moradores del universo newtoniano están de acuerdo en cuándo dos sucesos ocurren al mismo tiempo. En el einsteiniano, la unanimidad se quiebra. Para comprobarlo, vamos a considerar un sencillo experimento. Se instalan dos cámaras de vídeo; una, a bordo de un vagón de tren, y otra, en el andén de una estación. Sus objetivos proporcionan un vasto ángulo de visión sin distorsionar la imagen o, si se prefiere, a lo largo del vagón y del andén se disponen dos hileras de cámaras y con las imágenes que capta cada fila, en cada instante, se compone un solo fotograma. Las cámaras se sincronizan en el andén, antes de que el tren se ponga en marcha. Generan, además, suficientes fotogramas por segundo para retratar el viaje de un pulso de luz. Con el fin de que la máquina situada en la estación pueda registrar cuanto suceda en el tren, una de las paredes laterales del vagón se ha construido con paneles transparentes.

Concluida la sincronización, el tren arranca y se retira una cierta distancia, a la que se detiene. A la señal convenida, reanuda su marcha y se dirige hacia la estación. Al cruzar el andén, una lámpara se enciende y apaga en el centro exacto del vagón. El convoy mantiene una velocidad constante y, mientras recorre el andén, cada cámara rueda su versión del viaje de dos pulsos de luz, *A* y *B*, que tocarán paredes opuestas del vagón, perpendiculares al eje que define la vía del tren. Horas después, los experimentadores comparan las películas. En la figura 1 se muestra la secuencia que graba la cámara dentro del vagón. Para ella, el tren se halla en reposo en todo momento, ambos pulsos de luz atraviesan la misma distancia y alcanzan las paredes a la vez. Los sucesos «el pulso *A* toca la pared izquierda» y «el pulso *B* toca la pared derecha» son simultáneos.

¿Registra lo mismo la cámara del andén? La figura 2 reproduce su versión de la historia. Para ella, la luz marcha a la misma



velocidad en los dos sentidos. Como la pared izquierda del vagón se mueve hacia el pulso *A*, mientras la pared derecha huye del *B*, el primero se ve obligado a recorrer menos distancia que el segundo. ¡Los sucesos «el pulso *A* toca la pared izquierda» y «el pulso *B* toca la pared derecha» dejan de ser simultáneos! En el universo de Einstein no se puede afirmar taxativamente que dos acciones separadas en el espacio ocurran al mismo tiempo. Pueden sobrevenir antes o después para distintos observadores. La relatividad cuenta con una nueva transformación de coordenadas, un traductor matemático más refinado que el de Galileo

## UNA COMBINACIÓN EXPLOSIVA

Toda la magia de la relatividad especial se desprende al mezclar dos ingredientes: el principio de relatividad y la constancia de la velocidad de la luz. La física clásica convive en paz con el primero, pero para adoptar el segundo antes precisa de una reforma radical. El experimento del tren ilustra cómo esta singular propiedad de la luz, desconocida para los cuerpos materiales con los que trata la mecánica tradicional, es la bala cuyo impacto hace añicos los relojes del tiempo newtoniano. ¿Qué ocurre al sustituir los pulsos de luz por objetos más prosaicos —dos dardos, por ejemplo— y la lámpara, por un mecanismo que los arroje en sentidos opuestos contra las paredes del vagón? Efectuemos estas sencillas modificaciones y procedamos del mismo modo que antes. Una vez que el tren deja atrás la estación, ¿qué secuencias extraen los investigadores de las cámaras?

### Las dos películas

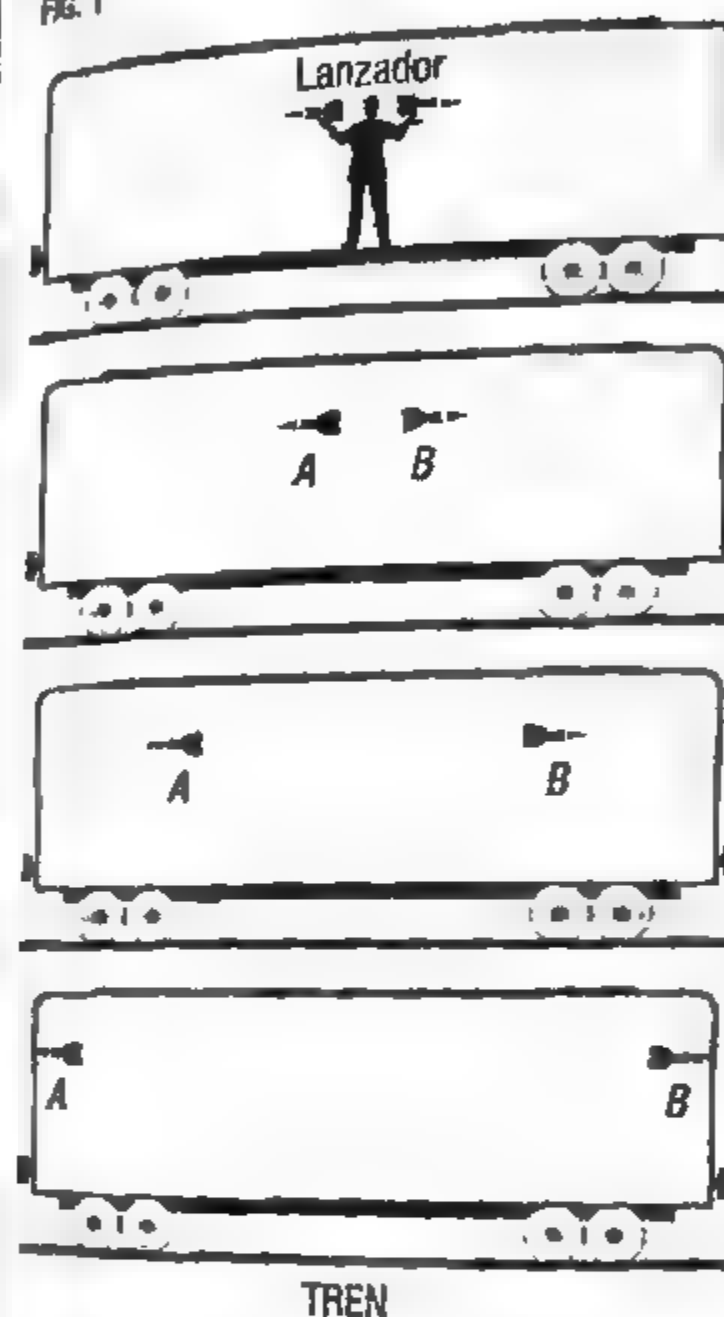
La figura 1 muestra la película que se rueda en marcha. Recuerda mucho la versión con los pulsos luminosos. Los dos dardos se mueven con la misma velocidad para cualquier pasajero del vagón. Recorren por tanto distancias iguales en tiempos iguales. La cámara registra el suceso «el dardo A se clava en la pared izquierda» en el mismo fotograma que el suceso «el dardo B se clava en la pared derecha». ¿La cámara de la estación los ubicará en fotogramas distintos, como hacía con los pulsos? Ahora las leyes de la física no conceden ningún privilegio a los dardos y, al contrario que la luz, sí se ven afectados por el movimiento del tren. El mecanismo que se ocupa de lanzarlos se traslada hacia la derecha con la misma velocidad,  $v$ , que el convoy y en ese desplazamiento lo acompañan los dardos que guarda en su interior. Cuando los dispara, imprime a cada uno una nueva velocidad ( $v$  y  $-v$ ), que debe sumarse a la que ya llevaban. El dardo A tiene que recorrer menos distancia, ya que la pared de la izquierda sale a su encuentro, pero no puede explotar esa ventaja, porque va más despacio: la velocidad que traía antes del lanzamiento, hacia la derecha,  $v$ , juega en su contra y se resta a  $v$ , ( $-v_A = -(v_1 - v)$ ). El dardo B balancea inconvenientes y ventajas de modo semejante. Debe recorrer una distancia mayor, porque la pared de la derecha se aleja de él, pero en este caso el movimiento del tren juega a su favor y su velocidad se suma a la que le imprime el mecanismo lanzador: va más deprisa ( $v_B = v_1 + v$ ). Los dardos vuelan con velocidades distintas para el observador del andén. Al examinar la película de la estación, los investigadores concluyen que en ella los sucesos «el dardo A se clava en la pared izquierda» y «el dardo B se clava en la pared derecha» también son simultáneos (figura 2). Con los dardos, la magia no se manifiesta. El privilegio de la luz es el que hace de la relatividad un principio revolucionario.

### Secuencia para después de los créditos

Ya que el curso temporal de las dos películas coincide, uno se podría sorprender de que la relatividad no se aplique a la dinámica de los dardos. ¿No hacen falta ya cortes oblicuos para saltar de un sistema de referencia a otro? ¿Vale todavía el viejo traductor de Galileo? La respuesta es que no. En rigor, siempre hay que utilizar el traductor relativista. A lo largo de todo

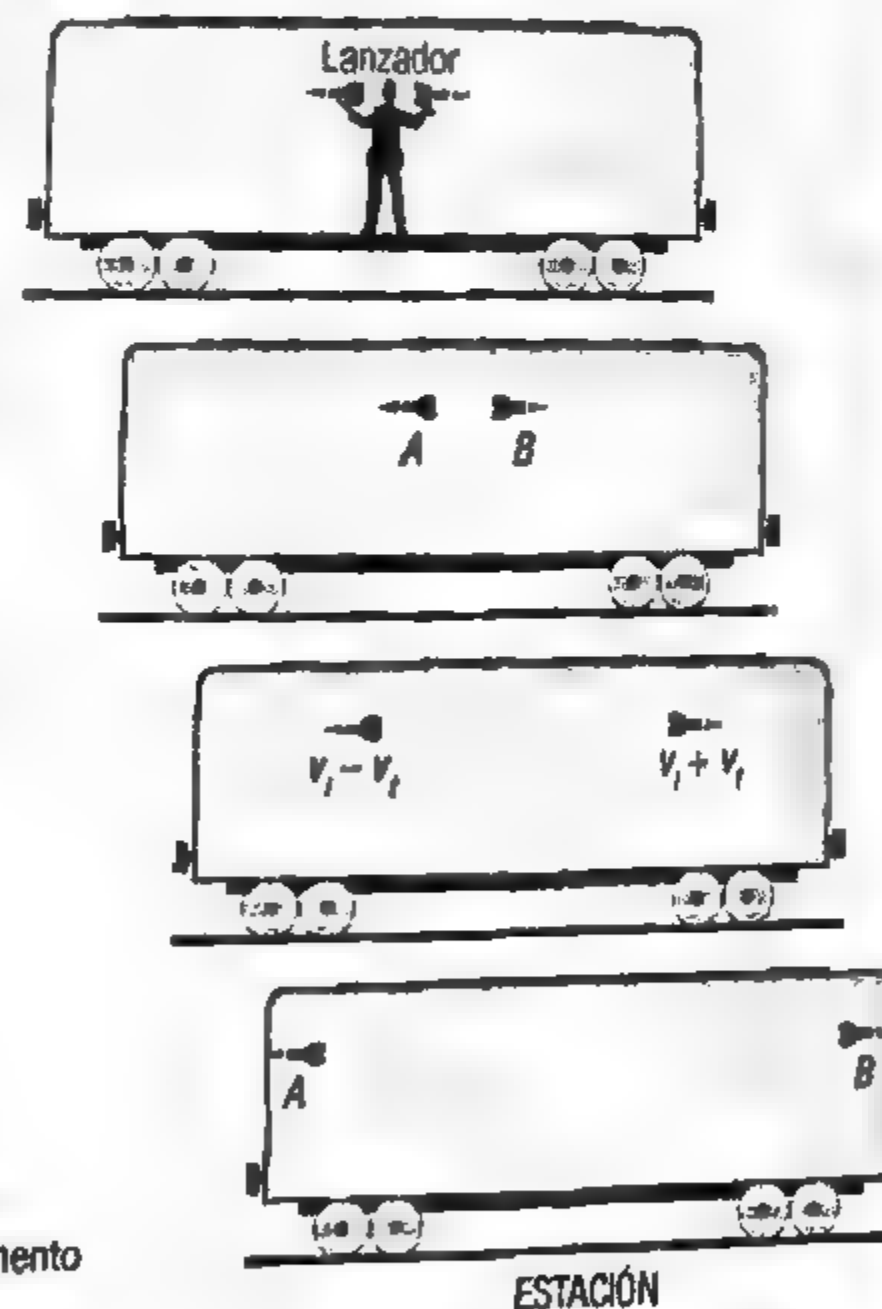
el experimento con los dardos, hemos dado muestras de una sensibilidad clásica. En el espacio-tiempo, las velocidades del tren y de los dardos no se pueden sumar ni restar siguiendo el procedimiento clásico. Al aplicar la nueva fórmula de Einstein, con hipersensibilidad relativista, se comprueba que, después de todo, los dardos no se clavan al mismo tiempo. No obstante, la falta de sincronía es tan leve que no existe la cámara capaz de advertirla.

FIG. 1



La simetría de la simultaneidad se mantiene para la cámara del andén. El dardo A recorre menos distancia, pero va más despacio. El dardo B recorre más distancia, pero vuela más deprisa.

FIG. 2



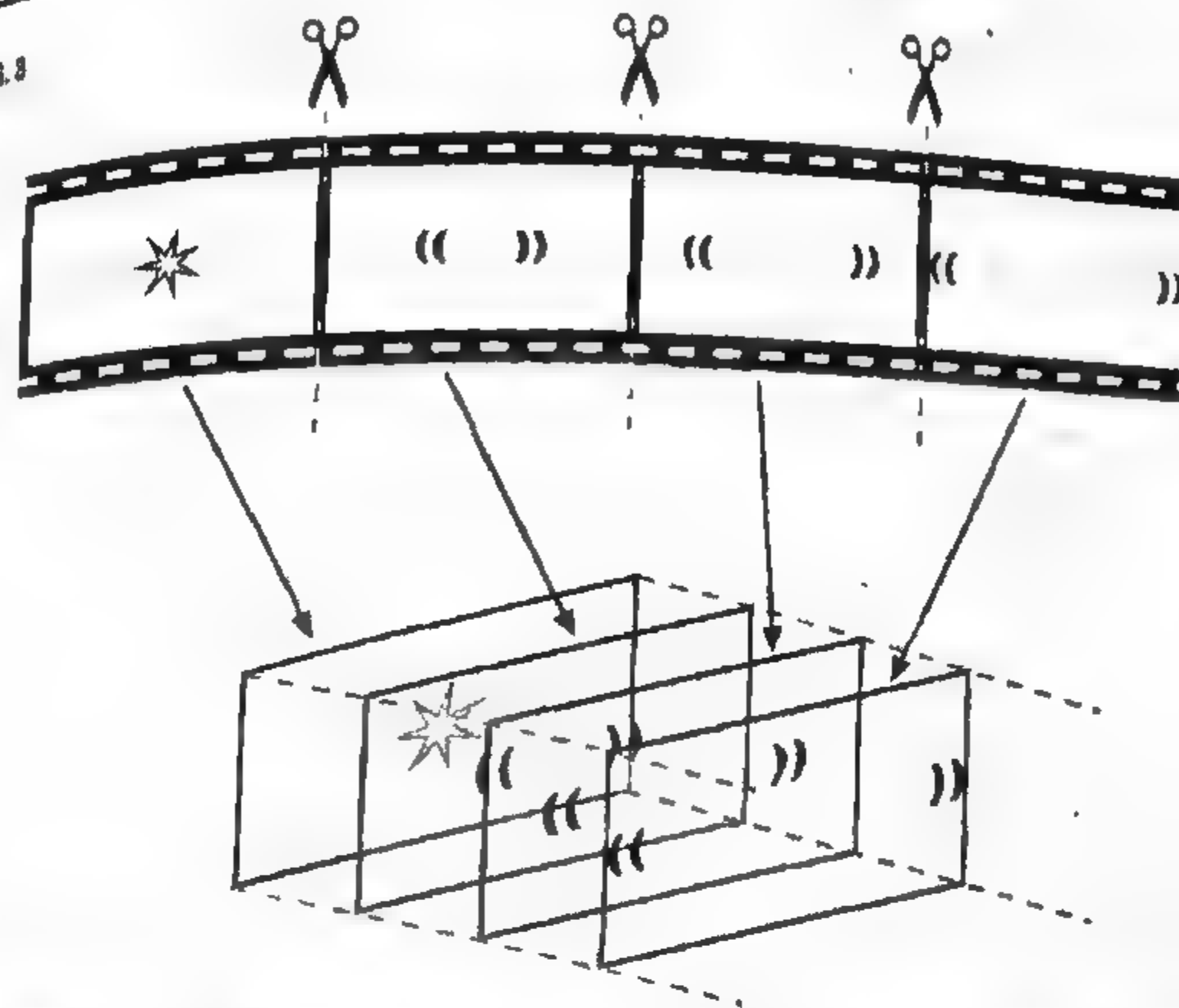
Dentro del vagón, la cámara rueda una película simétrica que parece un remake fiel del experimento con los pulsos luminosos.



o Newton, que relaciona entre sí las observaciones de cada sistema de referencia inercial. Tomando cualquiera de las dos películas, permite reconstruir uno a uno los fotogramas de la otra. Aquí vamos a examinar la conversión de un modo cualitativo, sin ecuaciones. Recortemos los fotogramas que integran cada película y coloquemoslos en fila, con las caras dispuestas en paralelo, como si fueran las páginas de ciertos libritos que, cuando se pasan las esquinas deprisa con el dedo, crean la ilusión quinetoscópica de movimiento (figura 3). En nuestro experimento mental, nos podemos permitir cámaras que impriman tantos fotogramas por segundo como queramos, hasta el extremo de componer una secuencia, a efectos prácticos, continua. La hilera de fotogramas se convierte así en un bloque (figura 4). Cada fotograma se extendía en dos dimensiones, con un ancho y un alto. La organización del bloque añade ahora una tercera dimensión, una profundidad que ya no corresponde al espacio, sino al tiempo. Surge así un ámbito físico que se despliega en tres dimensiones, dos espaciales y una temporal, que lo sustentan en pie de igualdad. Esta construcción encarna uno de los conceptos clave de la relatividad: el espacio-tiempo. La soldadura geométrica del tiempo con las coordenadas espaciales —que en nuestro mundo tridimensional arma un bloque de cuatro dimensiones— no figuraba en la formulación original de la teoría. Einstein la acabó adoptando tras ciertas reticencias y se debe a uno de sus antiguos maestros en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, el matemático lituano Hermann Minkowski. En un sentido, la revolución relativista derrocó el espacio y el tiempo universales, pero entronizó en su lugar otro absoluto: el espacio-tiempo.

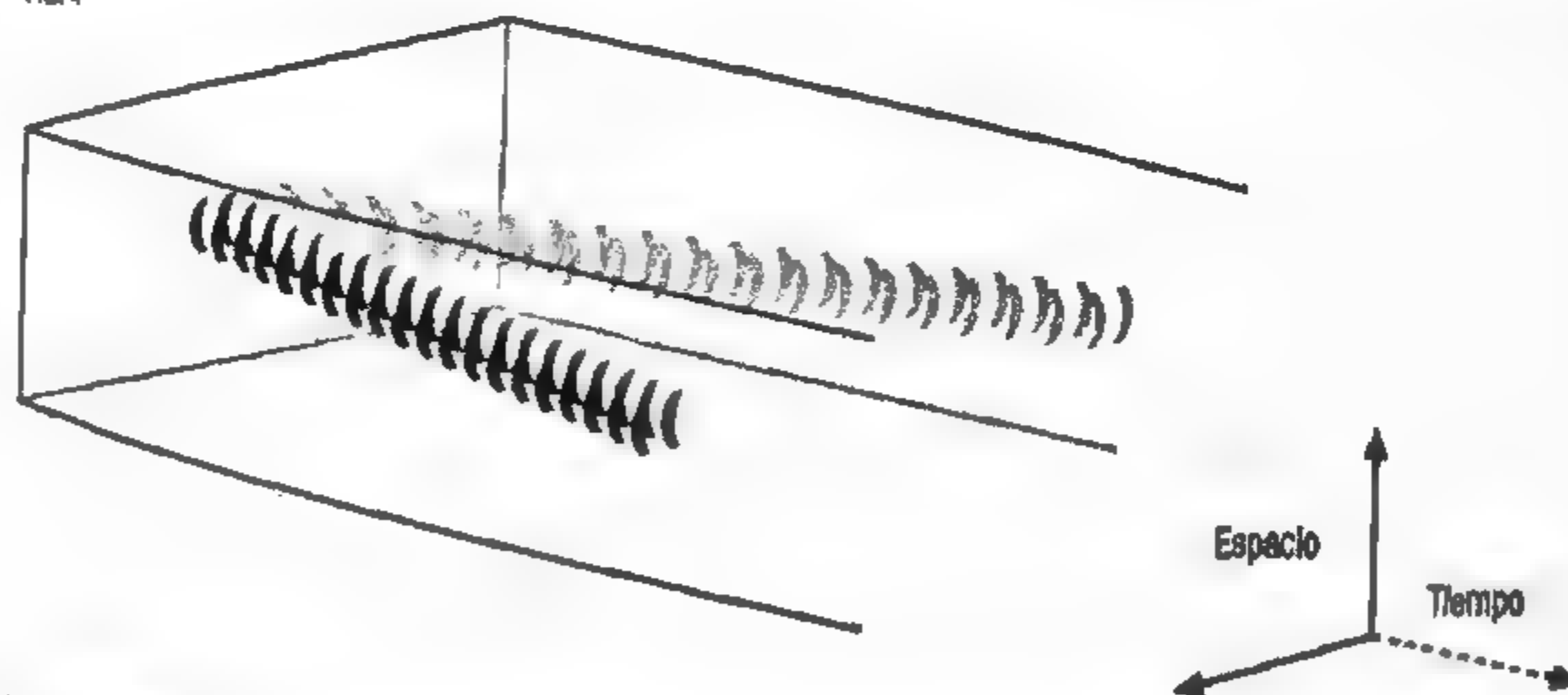
Cualquier corte del bloque que atravesase puntos que comparten la misma coordenada temporal (momentos simultáneos) produce uno de los viejos fotogramas. Al comparar las dos series, se comprueba que se puede obtener una a partir de la otra practicando cortes oblicuos (figura 5). Si rebanamos el bloque del vagón en lonchas sesgadas, surgen los fotogramas de la estación. Para extraer los fotogramas del tren a partir del bloque del andén, no hay más que invertir la inclinación del cuchillo,

FIG. 3



Después de cortar los fotogramas de la película —en este caso, la que se rodó en el vagón—, se disponen en el mismo orden y en paralelo.

FIG. 4



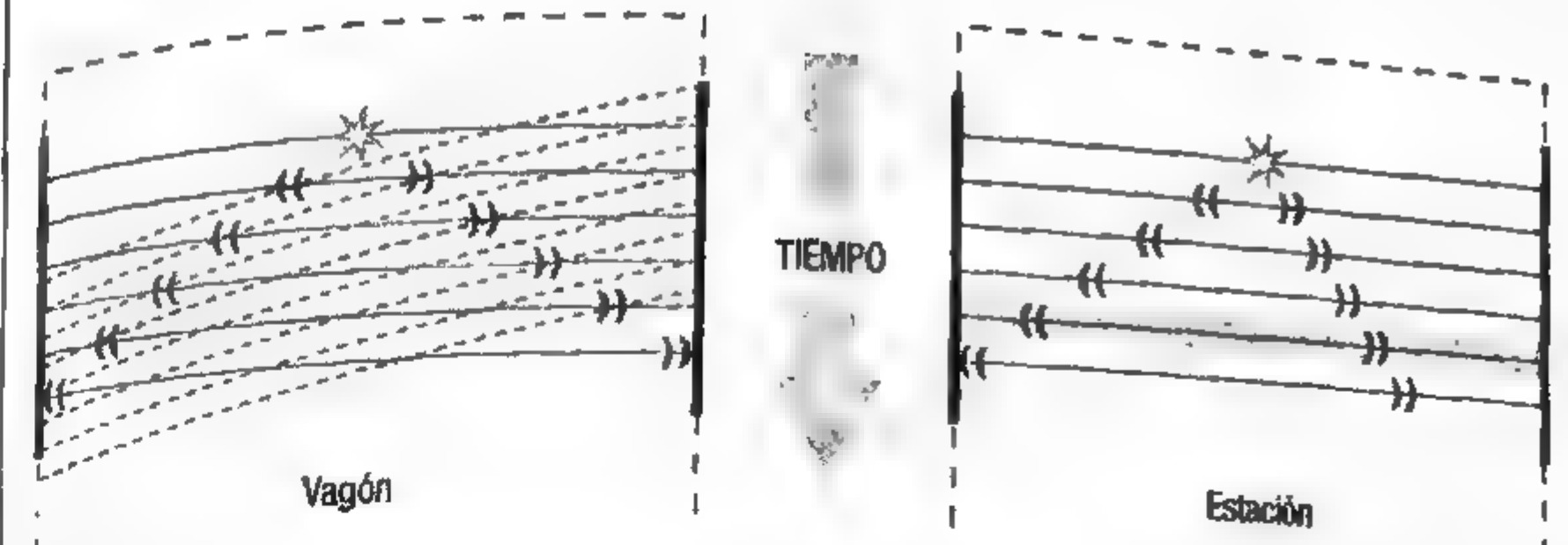
Una serie continua de fotogramas compone un bloque, que despliega en tres dimensiones el viaje de los dos pulsos de luz hasta las paredes. Las dimensiones espaciales proporcionan la altura y el ancho del bloque. La dimensión temporal, la profundidad.

como si el filo se reflejara en un espejo. Los cortes ponen de manifiesto uno de los aspectos más chocantes de la relatividad: lo que es puro espacio para la cámara de la estación (la base de sus fotogramas), se compone de una mezcla de lo que es espacio y de lo que es tiempo en el otro bloque (la base del fotograma de la estación cruza en diagonal las coordenadas espaciales y temporales del vagón). Parte del espacio del observador del andén es tiempo para el pasajero. Cuanto mayor sea la velocidad del tren, más oblicuo hay que hacer el corte, hasta alcanzar los  $45^\circ$ , un límite que corresponde a la velocidad de la luz y que el tren no puede superar (y ya puestos, tampoco alcanzar).

En este punto no se agotan las sorpresas. Al examinar con más cuidado el diagrama con los cortes, se constata que, según la perspectiva que se adopte, un suceso que forma parte del presente de un observador puede situarse en el futuro o el pasado de otro (figura 6). Estas discrepancias resultan imperceptibles en las distancias cortas y a velocidades bajas, comparadas con la de la luz, así que, para magnificar el efecto, separemos drásticamente la estación del tren.

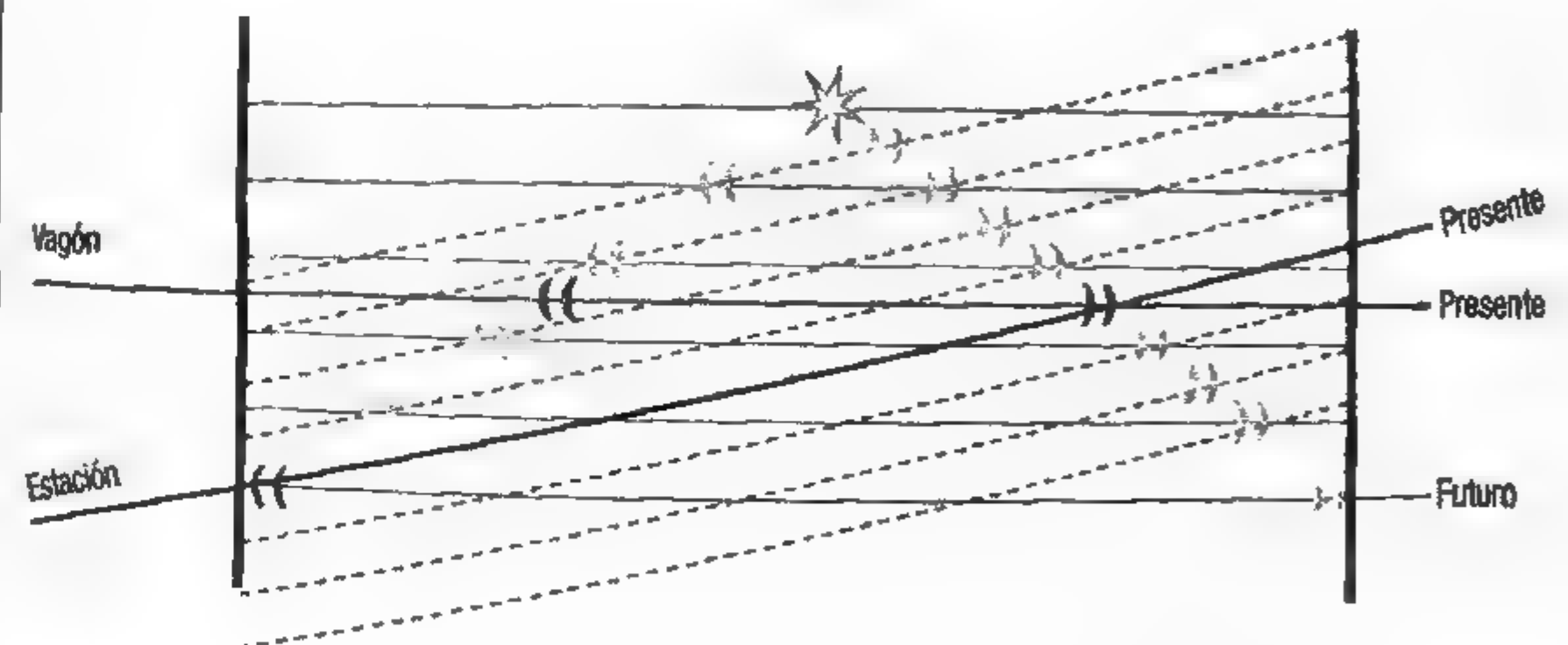
Imaginemos dos observadores, uno terrestre y otro a los mandos de una astronave que se encuentra a años luz de distancia. Una red de cámaras sincronizadas en la Tierra compone un vasto fotograma detrás de otro. Un segundo sistema de cámaras hace lo propio dentro del vehículo espacial. Una velocidad modesta de la nave basta para que, si proyectamos su línea de presente, termine cortando el futuro remoto de la Tierra, después de salvar una distancia extraordinaria (figura 7). Los observadores terrestres consideran su pasado perfectamente definido —y más ahora que lo registran con cámaras—, pero no tienen la más remota idea acerca de lo que les depara el futuro. A lo largo de su línea temporal, la porción de bloque que queda a sus espaldas se muestra nítida e inalterable, mientras que la que se extiende ante ellos solo ofrece formas inciertas y nebulosas, con un punto de inflexión móvil que es el presente, que siempre avanza. Lo mismo puede decir el piloto de la nave acerca de su propio bloque. Sin embargo, la relatividad señala que sucesos en el futuro de la Tierra pertenecen al presente del piloto. Luego esos instantes no

FIG. 5



La figura muestra los dos bloques vistos desde arriba. La flecha marca el sentido en el que avanza el tiempo. Las líneas verticales corresponden a las paredes del vagón. Cada línea horizontal representa un fotograma. Solo se han dibujado unos cuantos. Entre dos líneas cualesquiera se pueden intercalar tantos fotogramas como se quiera con estados intermedios. Los cortes oblicuos en el bloque del vagón producen los fotogramas del bloque de la estación. Se destaca en gris uno de ellos.

FIG. 6

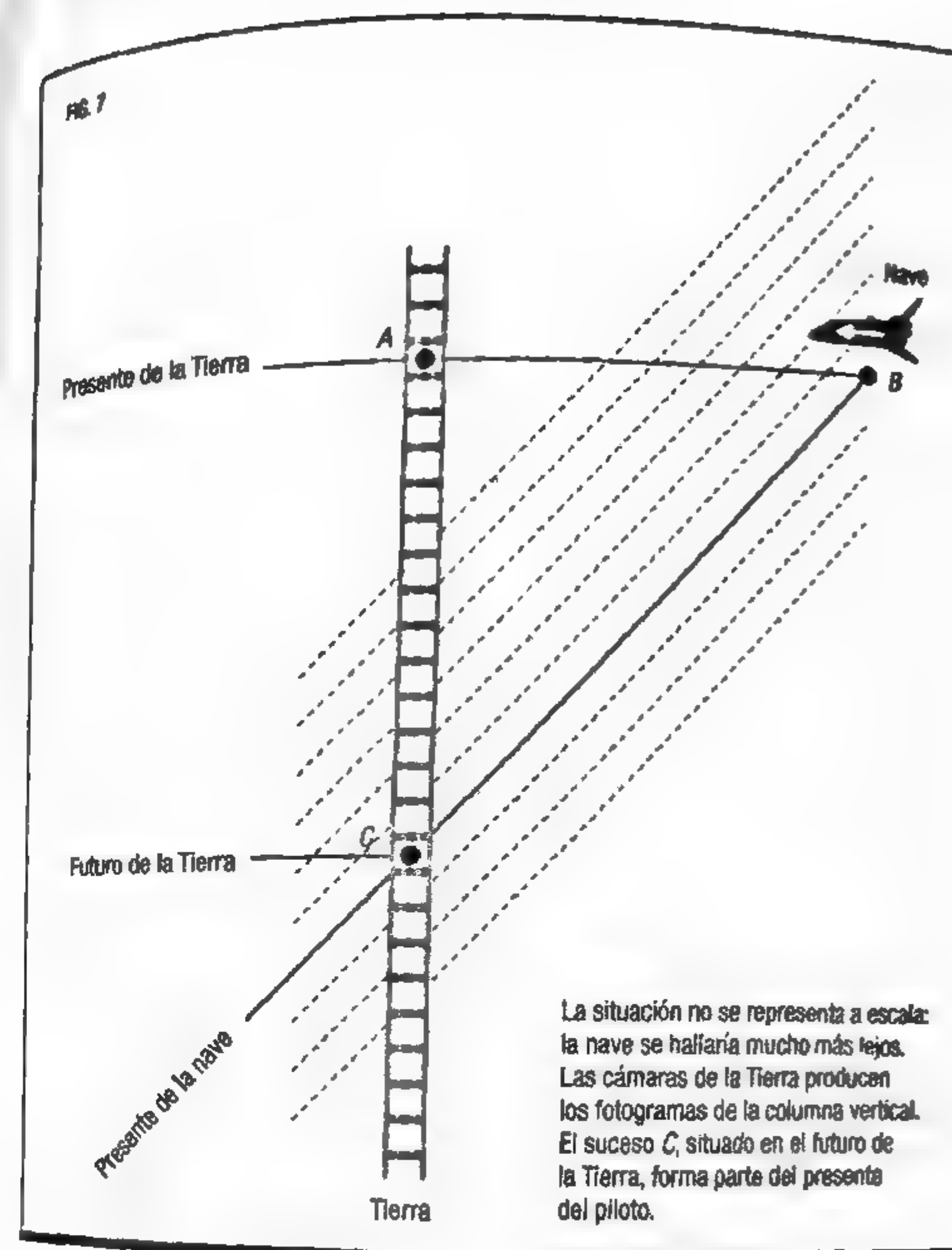


Se destacan tres pulsos de luz. La pareja de sucesos «el pulso A se encuentra a medio camino de la pared izquierda» y «el pulso B se encuentra a medio camino de la pared derecha» forman parte del presente del observador del andén. El segundo también forma parte del presente de la estación, pero otro suceso simultáneo para un observador del andén, «el pulso A toca la pared izquierda», forma parte del futuro del vagón.



aparecen envueltos en ninguna bruma de indefinición para él. Son tan concretos e inalterables como su pasado o el nuestro. El futuro de los seres humanos está sucediendo ahora o incluso sucedió hace tiempo para otros observadores. Extendiendo este principio a cualquier pareja de sistemas de referencia repartidos por el universo, desembocamos en un vasto volumen de cuatro dimensiones, un universo-bloque, donde está escrito todo lo que ha sido, es y será. Cualquier futuro es una región que para algún observador ha sido cartografiada con precisión. La incertidumbre no es más que una manifestación de ignorancia.

Bajo una perspectiva tetradimensional, el universo se presenta como un producto acabado, que no evoluciona, ya que hemos incorporado el tiempo como una dimensión más, a lo largo de la cual se exponen todos sus accidentes. El flujo del pasado al futuro aflora como una mera ilusión en los observadores que recorren el bloque siempre en la misma dirección y sentido. Igual que los objetos no se desvanecen o materializan en el espacio, a medida que se transita, lo mismo ocurre con los momentos. El universo-bloque alberga cada acontecimiento. Lo que pasa antes y después coexiste con lo que se sitúa arriba y abajo, a la derecha y a la izquierda. La relatividad especial despliega ante nuestra mirada incrédula un escenario abrumador, petrificado, que preserva la totalidad de los eventos. La simultaneidad es una simple cuestión de alineamiento. El suceso «el pulso A toca la pared izquierda» se ubica en un lugar, el suceso «el pulso B se encuentra a medio camino de la pared derecha», en otro. Dependiendo de bajo qué ángulo se contemplen, coincidirán o no. ¿Shakespeare se sube al escenario de un teatro de Londres para interpretar al padre de Hamlet en el preciso instante en el que leemos este libro? ¿O en el que muere uno de nuestros tataranietos? Valdría lo mismo preguntar si un árbol del parque se alinea con una farola de la explanada o con los edificios al otro lado de la carretera. Todo depende del punto de vista del observador y la relatividad no favorece ninguno. La fantasía humana de vivir en otra época histórica, en la Eurasia de los neandertales, la América del esplendor inca o la China de los Guerreros de Terracota se cumple para observadores remotos.



¿A qué obedece entonces la ilusión del fluir del tiempo? ¿Quién ilumina en orden los fotogramas? En el espacio tridimensional, ningún impulso nos fuerza a avanzar siempre en un sentido determinado, como nos sucede a lo largo de la dimensión temporal. Antes de perdernos en disquisiciones filosóficas, admitamos que el universo-bloque es fruto de una imaginativa extrapolación de imposible cumplimiento. De entrada, la Tierra no es un sistema inercial. Experimenta una constante acelera-

ción en torno al Sol, que a su vez se acelera en compañía de la Vía Láctea, que a su vez... Al piloto de la nave espacial, tarde o temprano se le agotará el combustible o tendrá que esquivar un meteorito y sufrirá una aceleración. En realidad no existen observadores inerciales estables. Por otro lado, hemos dado de sí los fotogramas más de la cuenta. Párrafos atrás señalamos que, al proyectar la línea de presente del piloto, esta termina cortando el futuro remoto de la Tierra. Esta

**Para nosotros, físicos convencidos, la distinción entre pasado, presente y futuro no es más que una ilusión, aunque se trate de una ilusión tenaz.**

ALBERT EINSTEIN

proyección cae fuera de su película, que solo incorpora los fotogramas que imprimen las cámaras dentro de la nave. Como mucho, puede reconstruir un fotograma virtual más amplio con información que reciba después, igual que nosotros podemos descubrir, mientras hablamos con un

amigo, que sufrió un accidente tres días antes, en el mismo instante en el que nosotros estábamos saliendo de un concierto. La extensión del fotograma fuera del ámbito de la nave entraña una construcción retrospectiva. Aun cuando nuestro futuro forme parte del presente del piloto, en ese presente él se encuentra surcando el vacío interestelar y no en la Tierra. A pesar de que los dos accidentes temporales coincidan en el hipotético fotograma de su presente, en ese momento no conoce nuestro futuro. Para hacerlo tendría que viajar hasta la Tierra o recibir un mensaje terrestre. Ninguna de las dos acciones se lleva a efecto instantáneamente, porque la barrera de la luz limita la velocidad con que la nave o una onda de radio pueden salvar la distancia astronómica que separa al piloto de nuestro planeta. Del resto de puntos del fotograma virtual de los que el piloto no recibe información, no podrá decir nada, por muy simultáneos que los considere. ¿Conclusión? Se preserva la incertidumbre acerca del futuro de los terrícolas, aunque si intercambian un mensaje con el piloto, este puede concluir que un incidente determinado (de su pasado, en el momento de leer el mensaje) coincidió con el suceso que le refieren los habitantes de la Tierra (suceso que ellos todavía no habían vivido en dicho pasado).

Con todo su misterio y su poder evocador, no se puede asumir la existencia del volumen tetradimensional que encierra todos los acontecimientos pasados, presentes y futuros. A lo sumo, se podrían armar algunos fragmentos y nunca llegaría a completarse. Los únicos capaces de disfrutar en directo de sus desconcertantes perspectivas y, por tanto, de considerarlo real son nuestra imaginación y una criatura de cuatro o más dimensiones, con sentidos que perciban partículas fundamentales que superen la velocidad de la luz. Con el mismo criterio, se comprende que su aparente inmovilidad tampoco contradice el flujo del tiempo. Los seres humanos son libres de organizar sus observaciones en una secuencia temporal y componer con ellas un bloque (de hecho, la secuencia tampoco sería continua), pero de ahí a razonar al revés y pensar que el bloque existe y niega el paso del tiempo media un salto lógico, como mínimo, aventurado.

Por último, conviene recordar que la relatividad especial no proporciona una descripción completa y coherente de todos los fenómenos físicos. La relatividad general, que integra en la teoría la interacción gravitatoria, maneja un espacio-tiempo menos rígido y estático. Hasta cierto punto, resulta fácil crear un universo de juguete siguiendo las normas de la relatividad especial. El modelo de la relatividad general tendría que someterse a ecuaciones infinitamente más complicadas. En el nuevo marco, la simultaneidad se convierte en un asunto más espinoso todavía.

En cualquier caso, para no perder de vista nuestro objetivo, ¿la relatividad especial desvirtúa nuestros argumentos sobre la flecha del tiempo? Lo cierto es que no. Incluso si aceptamos la visión del universo-bloque, este exhibiría la asimetría en todo su esplendor, petrificada como un insecto en una gota de ámbar. Si retrocediésemos a través del bloque a lo largo de nuestra línea temporal, los fotogramas compondrían secuencias (como la formación espontánea de hielos) que no se observarían al dar media vuelta y recorrer el bloque en sentido contrario. La relatividad especial expone los extraños fenómenos que se manifiestan cuando diversos observadores cotejan sus impresiones, pero ninguno de ellos advierte secuencias rebobinadas.



De perderse en cualquier latitud del bloque, una persona podría orientarse al advertir en qué dirección los fotogramas se suceden animando un incremento continuo de la entropía. La relatividad especial nos enfrenta a un tiempo muy poco familiar, sin duda, pero su excentricidad no parece guardar relación alguna con la flecha. Sus ecuaciones fundamentales son reversibles en el tiempo y sus observadores perciben la asimetría tan acusadamente como lo hacen los observadores clásicos.

## IRREVERSIBILIDAD CUÁNTICA

La mecánica cuántica se gestó durante las primeras décadas del siglo xx, desafiando a los científicos con una visión de la realidad más alucinada aun que la relatividad. La base operativa de la teoría —la ecuación de Schrödinger o el formalismo equivalente de Heisenberg— no muestra preferencia alguna por uno u otro sentido del tiempo y sus expresiones no se inmutan cuando se voltea  $t$  por  $-t$ . Una de sus facetas más enigmáticas radica en que la física trasciende el dominio de su ecuación fundamental. La solución de la ecuación de Schrödinger es una función, la función de onda, que se representa mediante la letra griega  $\Psi$ . ¿Qué magnitud física se esconde tras ella? ¿Una distancia acaso? ¿Una velocidad? ¿Una distribución de energía? Ni siquiera el propio Schrödinger logró establecer su identidad. Fue un alumno de Minkowski, Max Born, quien supo reconocer en ella un ingrediente crudo, que había que cocinar al fuego de las matemáticas, hasta transformarla en otra función,  $|\Psi|^2$ . Esta elaboración de  $\Psi$ , ahora sí, proporcionaba información acerca del mundo físico: la probabilidad de que un sistema cuántico se halle en cada uno de sus posibles estados. La operación que introdujo Born —semejante a elevar la función al cuadrado— no se desprende en modo alguno de la ecuación de Schrödinger. Funciona como un complemento autónomo, que se incorporó al formalismo para extraer los datos que atesora  $\Psi$ .

La teoría cuántica gira en torno a  $|\Psi|^2$ , un fichero de información. Como tal no representa nada tangible. Ningún microscopio electrónico ni acelerador de partículas sirve para averiguar

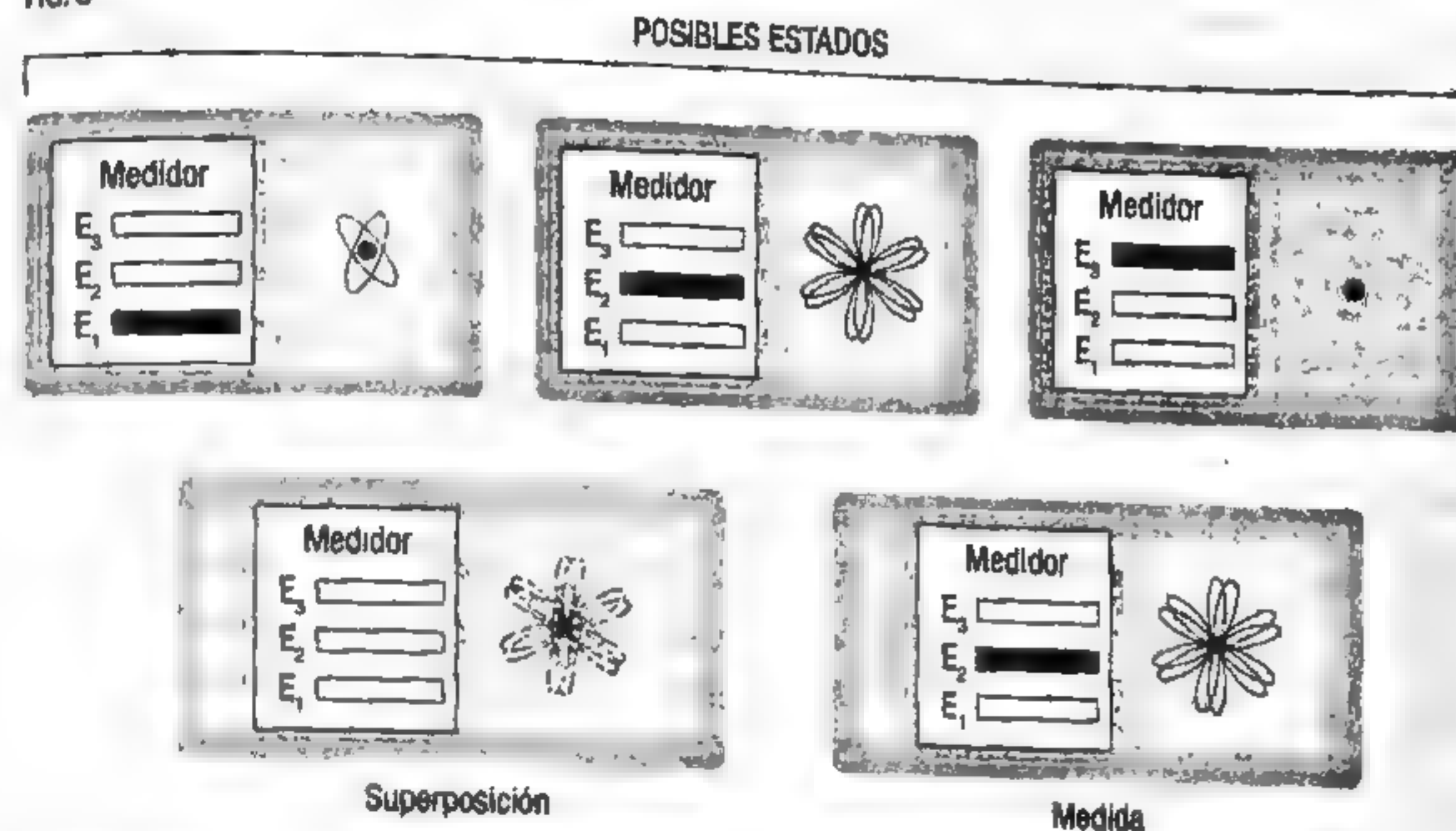
el valor de  $|\Psi|^2$  en un punto o en un instante. La función de onda ostenta la misma corporeidad que las probabilidades de que una persona gane jugando a la ruleta. Ofrece un abanico de alternativas y el físico, al sondear el mundo subatómico con sus instrumentos de medida, concreta una sola de ellas. ¿Cuál? *A priori* es imposible saberlo. Unas opciones son más probables que otras, pero en una observación particular podría materializarse cualquiera de ellas, hasta la más remota. Solo si se mide el mismo sistema infinidad de veces, bajo las mismas condiciones, se comprueba que la frecuencia de cada resultado se ajusta a la proporción que señala  $|\Psi|^2$ . La incertidumbre cuántica no obedece a lagunas en la información, como ocurre en la termodinámica de Boltzmann, donde las probabilidades emergen de la inviabilidad de conocer las posiciones y velocidades de trillones de partículas. Allí, bajo la superficie estadística, latén las partículas, con sus propiedades perfectamente definidas. En la esfera cuántica, lo único que se perfila con nitidez es la forma de  $\Psi$ , que no emerge de ninguna física subyacente. El valor de la energía de un sistema —de un átomo de hidrógeno, por ejemplo— se supedita a las probabilidades que decreta la función de onda. En la médula de la teoría reside la estadística, lo que no implica que reine una aleatoriedad ciega. La función de onda no trata igual todas las alternativas, promociona ciertas opciones, otorgándoles una probabilidad mayor, a costa de otras. Un favor tornadizo, ya que  $\Psi$  evoluciona con el tiempo, siguiendo las pautas que marca la ecuación de Schrödinger.

La mecánica cuántica posee particularidades perturbadoras. Un sistema, mientras no se observe, queda en suspenso, en lo que se conoce como una «superposición» de sus posibles estados. Como la función de onda se erige en el elemento de realidad más profundo de la teoría y no se decanta por ninguna opción, todas comparten un fantasmal estado de latencia, hasta que una medida las arranca del trance. Para representar la situación, a veces se recurre a un efecto espectral, donde las alternativas se sobrepresionan en la misma imagen (figura 8). El proceso de medida desvanece todas excepto una. Schrödinger ilustró el fe-

nómeno con uno de los experimentos mentales más famosos de la ciencia. Concibió una situación en la que un gato se encierra en una cámara de acero en compañía de un mineral radiactivo. Las leyes cuánticas dictan que, transcurrida una hora, hay un 50% de probabilidades de que se desintegre un átomo del mineral. El maquiavélico experimentador ha instalado en la cámara un contador Geiger. En cuanto este detecta los productos de la desintegración, activa un mecanismo que rompe una ampolla de ácido cianhídrico. Los lectores de novelas policiacas conocen bien el olor a almendras amargas de este gas extremadamente tóxico. Su inhalación acaba de modo fulminante con los protagonistas de los libros de Agatha Christie y también con el desdichado gato. Una vez que se cierra la cámara, el destino del animal queda en manos de las leyes cuánticas. El cuadrado de la función de onda evoluciona con el tiempo enseñando cómo se reparten las apuestas (figura 9).  $|\Psi|^2$  encarna el máximo grado de conocimiento sobre la condición del gato que nos brinda la teoría cuántica. Para ir más allá, hay que observar y precipitar la medida. Si se repitiese el experimento un número suficiente de veces, en la mitad se verificaría la desintegración y en la otra mitad, no. Mientras no se abra la cámara y se examine su interior, el gato concilia vida y muerte en un equilibrio inverosímil. Después de abierta, se puede decir que la curiosidad mató al gato... o lo salvó. El gato de Schrödinger pretende llamar la atención sobre el insólito estado natural que la mecánica cuántica propugna para las partículas elementales. Su esencia no es solo estadística, maneja distribuciones de probabilidad muy diferentes de las clásicas.

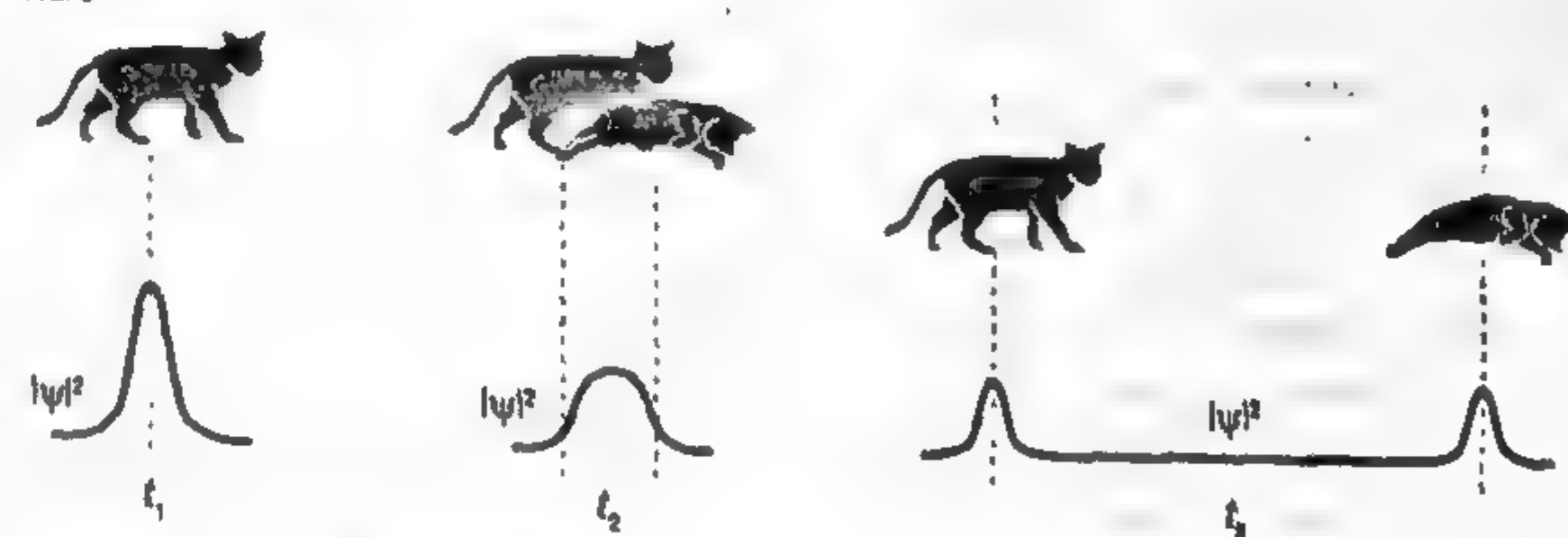
El espacio que media entre el repertorio de posibilidades que contempla la función de onda y la opción que termina imponiéndose con la medida comprende un territorio casi mítico, de geografía dudosa, objeto de conjeturas y debates inextinguibles desde los albores de la mecánica cuántica. Si confiamos en que la transición se produce de modo aleatorio, parece surgir, a nivel fundamental, un proceso irreversible, que no se podría deshacer. El término «aleatorio» no debe entenderse aquí en el sentido de que todos los estados compitan por materializarse con la misma probabilidad, sino en el de que es imposible determinar a

FIG. 8



Un cierto átomo se puede encontrar en tres estados de energía. Mientras no se observe, se halla en una superposición de los tres. La medida materializa uno solo de ellos.

FIG. 9



La función  $|\Psi|^2$ , con las probabilidades, evoluciona de forma continua desde el momento  $t_1$ , en el que se cierra la cámara. Transcurrida una hora, instante  $t_3$ , considera los dos estados, vivo o muerto, en pie de igualdad.

*priori* el desenlace de una medida concreta. No existe ninguna ecuación que sirva de guía para deshacer el camino desde la opción favorecida por la medida al estado de la función de onda en el instante inmediatamente anterior. Esa falta de continuidad bloquea, desde luego, los rebobinados deterministas que invier-



ten las trayectorias de todas las partículas clásicas, trayectorias proscritas de todas formas por la incertidumbre cuántica. ¿Es esta irreversibilidad la que aflora a escala macroscópica definiendo la flecha del tiempo? De ser así, ¿cómo suprime las reversiones? ¿De qué manera impide que el hielo brote en el vaso de agua templada o que la lluvia se precipite desde el suelo hacia las nubes? ¿Cómo puede la intervención de un observador favorecer siempre los macroestados con más microestados?

Es más, el simple acto de abrir la caja decidirá el estado del gato, aunque en este caso podía encontrarse en tres estados definidos. A saber: Vivo, Muerto o Muy Cabreado.

TERRY PRATCHETT, EXTRAÍDO DE SU NOVELA  
LORES Y DAMAS

bilitar el botón de rebobinado, sino en que las leyes fundamentales prohíban fenómenos que serían versiones rebobinadas de los que se manifiestan macroscópicamente en la naturaleza. Si la medida selecciona a ciegas una u otra opción y la ecuación de Schrödinger se muestra indiferente al sentido del tiempo, el proceso no parece introducir esa clase de sesgo.

Aun así, para despejar de verdad la cuestión, convendría iluminar el tramo que media entre el punto donde la ecuación de Schrödinger dice su última palabra y aquel en el que se materializa una de las opciones de la función de onda. Se han intentado tender muchos puentes, de consistencia desigual, para salvar ese vacío. Algunos añaden términos a la ecuación de Schrödinger, para crear una función  $|\Psi|^2$  que evoluciona hasta que las probabilidades de todos los estados caen a cero, salvo la de aquel que se observa. Estas teorías introducen en ocasiones asimetrías temporales. De momento, ninguna ha sido capaz de garantizar que la entropía disminuya de cara al pasado y aumente de cara al futuro, justificando la flecha del tiempo. El puente de apariencia más robusta, la «decoherencia», se debe al alemán Heinz-Dieter Zeh, que levantó su estructura en 1970.

Los sistemas que estudia la mecánica cuántica tradicional se mantienen aislados del resto del mundo, algo que solo sucede en la imaginación de los físicos teóricos y en ciertos laboratorios, gracias a la perseverancia de los físicos experimentales, que deben poner a prueba todo su ingenio para conseguirlo. En la naturaleza, los sistemas cuánticos se relacionan con un ambiente sumamente complejo. Esta interacción disuelve cualquier frontera entre el sistema y el entorno, donde puede acechar o no un observador. Ambos se deben considerar ingredientes cuánticos de la realidad y una función de onda universal los entrelaza. A pesar de todo, se puede aislar un sistema —que etiquetaremos con la letra  $A$ — y describirlo mediante una función de onda independiente,  $\psi_A$ , desgajada de la universal, que caiga en el trance de una superposición. Ahora bien, el mundanal ruido, tarde o temprano, se inmiscuirá. La injerencia fortuita de cualquier partícula ajena, un electrón, un fotón de radiación infrarroja o del fondo cósmico de microondas, basta para romper la incomunicación. La función de onda  $\psi_A$  abandona entonces su ensimismamiento para fundirse con la función de onda global  $\psi$ , con más propiedad, la función de onda global evoluciona de modo que  $A$  ya no se puede seguir describiendo con una función independiente. La secuencia obedece en todo momento a los dictados de la ecuación de Schrödinger. La parte de la función global que contempla las alternativas de  $A$  sufre una mutación mientras el sistema sale de su aislamiento. Sus extravagantes superposiciones se debilitan, hasta que al final únicamente sobreviven estados que corresponden a alternativas clásicas.

Da la impresión de que la comunicación con el entorno ha devuelto la sensatez al ámbito subatómico, pero la extrañeza no se ha evaporado, simplemente se ha filtrado al resto del universo, que abarca la función de onda global. La realidad completa, con el observador dentro, ha quedado atrapada en el tejido cuántico. La función de onda global, como cualquier otra, exhibe un catálogo de opciones, cada una con su probabilidad asociada, y se sitúa en una superposición que ningún observador humano puede ya deshacer, puesto que se ha integrado en ella. ¿Quién,



o mejor qué, materializa entonces una u otra de las alternativas globales? De momento, nadie conoce la respuesta.

En cada alternativa de la función de onda global se ensambla una opción clásica de  $A$  con un estado del resto del universo, que somos incapaces de definir, dada su complejidad inabarcable. A efectos formales, el tratamiento estadístico que maneja los estados de aspecto clásico de  $A$ , intentando subsanar la ignorancia sobre su conexión con los estados cuánticos del resto del universo, equivale al tratamiento estadístico que intenta subsanar la ignorancia acerca de las posiciones y velocidades de las partículas clásicas de Boltzmann. Así, desde la distancia macroscópica, el paisaje cuántico se confunde con el clásico.

Si la tierra de nadie entre la indecisión de  $\Psi$  y la resolución de la medida suscitaba dudas acerca de la sensibilidad cuántica para distinguir entre pasado y futuro, con la decoherencia, el observador —junto con aquellos fenómenos que motivan su conciencia de una flecha del tiempo— se integra en la función de onda de universo, cuya dinámica se somete por entero a la ecuación simétrica de Schrödinger. Bajo su jurisdicción, se mantiene en pie la paradoja de un mundo microscópico de leyes rebobinables que sustenta un mundo macroscópico irrebobinable. Lo hace en términos que resultan equiparables a los que plantea el modelo microscópico clásico, más ingenuo, que hemos venido usando hasta ahora. En todo caso, habría que reformular el desafío para intentar explicar las peculiares condiciones iniciales de la función de onda del universo.

## ¿EL ESPEJO ROTO?

Las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica y de la relatividad especial no se inmutan cuando la moviola del montador las hace avanzar o retroceder en el tiempo, pero no sucede lo mismo con las ecuaciones del modelo estándar, que amalgama ambas teorías. En realidad, la asimetría saltó primero en los laboratorios y las ecuaciones se modificaron en consecuencia, con objeto de acomodarla. Se trata de un efecto bastante restringido,

ya que hasta ahora solo se ha manifestado en contados procesos que media una de las fuerzas nucleares, la interacción débil. James Cronin y Val Fitch proporcionaron evidencias del fenómeno en el Brookhaven National Laboratory, en 1964. A partir de la década de 1990, observaciones más directas lo han confirmado. La desintegración de ciertas partículas que no son elementales, los kaones y mesones  $B$  —compuestas por parejas de quarks y antiquarks—, se produce con más frecuencia que el proceso equivalente a su versión rebobinada. La asimetría, muy ligera, no implica que la desintegración sea sobre el papel irreversible, tan solo que su ejecución inversa se produce, de media, un menor número de veces.

La mayoría de los físicos considera que una transgresión tan leve y localizada no puede dar cuenta de la asimetría en la evolución de las variables macroscópicas de un sistema. En el hielo y en el agua templada, por ejemplo, no asoma ningún kaón o mesón  $B$  que pueda desequilibrar la balanza en un sentido u otro, para que siempre tenga lugar la fusión y nunca la formación espontánea del hielo.

Haciendo un somero recuento, la relatividad especial no supone ninguna amenaza para la explicación cosmológica de la flecha del tiempo. La mecánica cuántica guarda todavía sus bazas. Podría revelar una dramática asimetría en sus ecuaciones fundamentales, aunque no asoma en las versiones que gozan de más favor en la actualidad, como la decoherencia. Hay físicos que trabajan en teorías cuánticas de la gravedad —en donde el tiempo llega a esfumarse— que advierten de que aún queda lugar para la sorpresa. Por su parte, el modelo estándar tampoco ofrece alternativas claras, aunque se trata de una teoría incompleta que no incorpora los efectos gravitatorios. Parece evidente que, antes de zanjar la cuestión de si la flecha del tiempo procede de una asimetría en las ecuaciones o de unas singulares condiciones iniciales, hace falta conocer las ecuaciones definitivas, una causa todavía abierta. Mientras continúe colgando de la física el cartel de «en construcción», la hipótesis cosmológica ofrece un argumento operativo más que razonable. Un aumento sostenido de la entropía del universo



basta para definir la flecha del tiempo, y si al final esta no se deriva de las condiciones iniciales, tendríamos una sospechosa sobreabundancia de explicaciones. Al margen de que el propio origen del tiempo seguiría aguardando, como el acertijo de la esfinge, una respuesta.

## LECTURAS RECOMENDADAS

- ATKINS, P.W., *La segunda ley*, Barcelona, Prensa Científica, 1992.
- CARROLL, S., *Desde la eternidad hasta hoy*, Barcelona, Debate, 2015.
- DAVIES, P.C.W., *The Physics of Time Asymmetry*, Berkeley, University of California Press, 1974.
- GELL-MANN, M., *El quark y el jaguar*, Barcelona, Tusquets, 1995.
- GREENE, B., *El tejido del cosmos*, Barcelona, Crítica, 2006.
- GUTH, A.H., *El universo inflacionario*, Madrid, Debate, 1999.
- HAWKING, S.W., *Historia del tiempo*, Barcelona, Crítica, 1988.
- PENROSE, R., *La nueva mente del emperador*, Madrid, Mondadori, 1991.
- WHEELER, J.A., *Un viaje por la gravedad y el espacio-tiempo*, Madrid, Alianza, 1994.
- ZEH, H.D., *The physical basis of the direction of time*, Nueva York, Springer-Verlag, 1989.

## INDICE

////////////////////////////////////

- agujero negro 108, 119  
Agustín de Hipona 8  
Alpher, Ralph Asher 98, 99  
Andrómeda, galaxia 85, 87, 96  
*Así hablaba Zaratustra* 69  
asimetría 8-10, 12, 17, 18, 20, 29, 30,  
39, 41, 44, 46, 47, 52, 56, 62, 66-68,  
70, 74, 75, 80, 81, 126, 130, 145, 146,  
150, 152, 153  
  
Bernoulli, Daniel 55  
Bethe, Hans 98  
Big Bang 11, 35, 37, 81, 92, 94, 99, 102-  
104, 108, 111, 114, 115, 124  
Black, Joseph 43  
Boltzmann, Ludwig 11, 37, 56, 59-70,  
72, 74, 75, 85, 103, 104, 147, 152  
Boyle, Robert 42, 55  
Brookhaven National Laboratory 153  
  
calor 43-55, 58, 60, 62  
campo  
cuántico 100, 116, 117, 121, 124, 125  
  
de Higgs 125  
de inflación 117, 118, 120-125  
gravitatorio 90, 114, 120, 122, 125  
magnético 35  
Carnot, Sadi 43, 44, 47, 50, 52, 54, 62  
cefeida 86, 87  
Christie, Agatha 148  
Clapeyron, Émile 43  
Clausius, Rudolf 44, 47, 55, 56, 60,  
62, 70  
Cronin, James Watson 153  
curvatura 111-114  
  
decoherencia 150, 152, 153  
degradación de la energía 53  
densidad crítica 112  
Dicke, Robert Henry 99, 102  
Dirac, Paul Adrien Maurice 9  
  
Eddington, Arthur 10, 46, 92  
Einstein, Albert 11, 16, 21, 88-92, 110,  
114, 133, 135, 137, 138, 144  
*El Hobbit* 10



energía cinética 46-49, 51, 52, 58, 64,  
103, 122  
entropía 45, 59-62, 64-67, 70, 72-81, 83-  
85, 94, 103-110, 118, 119, 124, 125,  
129, 146, 150, 153  
definición 59, 60, 62, 118  
gravitatoria 110, 118, 121, 124  
térmica 118  
equilibrio metaestable 116, 117, 120,  
122-124  
espacio-tiempo 89-92, 94, 98, 105,  
110-112, 114, 116, 117, 121, 124,  
137, 138, 145  
eterno retorno 71

Fitch, Val Logsdon 153  
flecha del tiempo 8-12, 16, 18, 20, 27,  
30, 31, 34, 36, 37, 39, 41, 44, 54, 58,  
65, 66, 75, 79, 84, 94, 103, 108, 119,  
121, 124, 126, 127, 129, 141, 145,  
146, 150, 152-154  
fluctuación 70, 74, 75, 78-80, 83, 84,  
102, 122  
fondo cósmico de microondas 103,  
104, 109, 111, 112, 118, 121, 129,  
151  
Friedmann, Alexander 92, 110  
función de onda 17, 146-152

Gamow, George 98  
Gibbs, Josiah Willard 37, 56  
*Gifford Lectures* 10  
Guth, Alan Harvey 113, 114, 116, 122,  
125

Harvard College, observatorio del 86,  
92  
Hawking, Stephen 108  
Heisenberg, Werner 146  
Herman, Robert 98, 99  
Hinton, Charles Howard 89  
homogeneidad 91, 92, 105, 111, 113  
Hooke, Robert 42

horizonte, problema del 111-114, 125  
Hoyle, Fred 92, 94

Hubble  
constante de 88, 94  
Edwin 80, 87, 88, 92, 96  
ley de 88, 92, 93

inflación 111, 114-116, 118, 121, 122,  
124, 125  
interacción 11, 16, 48, 69, 80, 95, 96,  
103-105, 107, 109, 113, 145, 151  
débil 104, 110, 153  
fuerte 104, 110  
isotropía 91, 92, 111

Joule, James Prescott 44

Kant, Immanuel 87  
kaón 17, 153

*La cuarta dimensión* 89  
Laboratorios Bell 99  
Lambert, Johann Heinrich 43  
Leavitt, Henrietta Swan 86  
Leibniz, Gottfried 21  
Lemaître, Georges 92, 94, 103, 110  
longitud de onda 98-101  
Lorentz, Hendrik Antoon 103  
Loschmidt, Johann Josef 67-70, 72  
paradoja de 67-69

Mach, Ernst 56, 67  
macroestado 45, 57-59, 61, 63-65, 103,  
105, 110, 150  
máquina  
de movimiento perpetuo 45  
de vapor 43, 44, 47-50, 53, 66  
térmica 43, 44, 47, 50-52, 62, 107  
Maxwell, James Clerk 16, 37, 56, 67,  
132, 133  
mecánica cuántica 10, 16, 109, 116,  
130, 146-148, 151-153  
Méliès, Georges 17

mesón B 17, 153  
microestado 45, 58-59, 61, 63-67, 70,  
74, 106, 110, 111, 125, 150  
Minkowski, Hermann 138, 146  
modelo estándar 16, 109, 111, 116,  
130, 152, 153  
Monte Wilson, observatorio de 86, 92  
muerte térmica 54, 67, 71, 75

Newcomen, Thomas 44  
Newton, Isaac 11, 16, 20, 21, 43, 88,  
90, 114, 115, 120, 130, 132-134, 138  
Nicolás de Oresme 71  
Nietzsche, Friedrich 71

Ostwald, Wilhelm 67, 85

partículas  
de materia 104, 109, 116, 121  
mediadoras 104, 109, 113, 116, 121  
Peebles, Phillip James 99  
Penrose, Roger 76, 107  
Penzias, Arno Allan 99, 102  
Planck, Max 56, 60, 67, 71  
observatorio espacial 102, 112  
planitud, problema de la 111-114,  
125  
plasma 95, 103-106  
Poincaré, Henri 133  
Pratchett, Terry 150  
presión negativa 116, 120, 122, 123,  
125

recurrencia, paradoja de la  
relatividad  
especial 9, 10, 16, 89, 109, 130, 133,  
142, 145, 146, 152, 153  
general 10, 16, 88, 90-92, 104, 109-  
111, 114, 116, 145  
principio de 96, 131, 133, 136  
Roll, Peter 99, 102

Savery, Thomas 44  
Schrödinger Erwin 146, 147  
ecuación de 11, 16, 146, 147, 150,  
151, 152  
gato de 148  
segunda ley de la termodinámica 39,  
46, 47, 53, 54, 56, 58, 60, 62, 64-70,  
72, 74, 75, 79, 85, 106, 107, 129  
Shapley, Harlow 86, 87  
Simmel, Georg 71  
singularidad 94, 95, 103, 105, 109, 124  
sistema  
de referencia inercial 130, 132, 138  
macroscópico 41, 59, 63, 70  
Slipher, Vesto Melvin 87, 92  
Snow, Charles Percy 47  
superposición (cuántica) 147, 149,  
151

termodinámica 41-43, 45-47, 54-56,  
58-60, 65, 85, 120, 147  
Thomson, William 43, 44, 47, 53, 56,  
67  
trabajo 43-48, 50-55, 62  
transformación de coordenadas 131,  
135  
Tryon, Edward 123, 125

universo-bloque 142, 143, 145

Vía Láctea 78, 85-87, 96, 102, 114, 131,  
144

Waterston, John James  
Watt, James 44  
Wheeler, John Archibald 90, 110  
Wilkinson, David Todd 99, 102  
Wilson, Robert Woodrow 99, 102

Zeh, Heinz-Dieter 150  
Zermelo, Ernst 67, 71, 85